

**AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND- UND
KIEFERHEILKUNDE
DES FACHBEREICHS MEDIZIN
DER PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG**

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. R. Frankenberger

Abteilung für Zahnersatzkunde

Direktor: Prof. Dr. U. Lotzmann

Bereich für Zahnärztliche Propädeutik und Kiefer-Gesichts-Prothetik

Ltd. OA Prof. (apl.) Dr. M. Gente

in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,
Standort Marburg

**Entwicklung eines neuen Applikationsverfahrens für fließfähige
Komposite zur Reduktion polymerisationsbedingter
Spannungen**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

Dem Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Simone Dudda

Aus Essen

Marburg 2014

**AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND- UND
KIEFERHEILKUNDE
DES FACHBEREICHS MEDIZIN
DER PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG**

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. R. Frankenberger

Abteilung für Zahnersatzkunde

Direktor: Prof. Dr. U. Lotzmann

Bereich für Zahnärztliche Propädeutik und Kiefer-Gesichts-Prothetik

Ltd. OA Prof. (apl.) Dr. M. Gente

in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,
Standort Marburg

**Entwicklung eines neuen Applikationsverfahrens für fließfähige
Komposite zur Reduktion polymerisationsbedingter
Spannungen**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

Dem Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Simone Dudda

Aus Essen

Marburg 2014

Angenommen vom Fachbereich Medizin der
Philipps-Universität Marburg am: 13. November 2014

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Herr Prof. Dr. H. Schäfer

Referent: Herr Prof. Dr. M. Gente

1. Koreferent: Herr Prof. Dr. R. Frankenberger

Meinen Eltern

und meinem Doktorvater Prof. Dr. Michael Gente gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Literaturbericht	4
2.1 Aushärtung von lichthärtenden Kompositen	4
2.2 Schrumpfbedingte Spannungen.....	5
2.3 Das Gradientenmodell	6
2.4 Konventionelle Techniken zur Spannungsreduktion.....	8
2.5 Trend zur Blockfüllung	11
2.6 Polarisiertes Licht.....	14
3. Material & Methode	16
3.1 Versuchsmaterialien	16
3.1.1 Lichtempfindlichkeit der untersuchten Materialien im Vergleich	17
3.2 Spannungsmessung	18
3.2.1 Spannungsoptischer Versuchsaufbau	19
3.2.2 Modellkavitäten	20
3.2.3 Versuchsdurchführung und –dokumentation	21
3.2.4 Versuchsauswertung	23
4. Entwicklung einer neuen Applikationstechnik für fließfähige Komposite	27
4.1 Kompositapplikation laut Herstellerangabe.....	27
4.2 Kompositapplikation unter Anwendung der Schichttechnik	27
4.3 Vorversuche zur Vorbelichtung.....	27
4.4 Kompositapplikation unter Vorbelichtung.....	31
4.4.1 konstante Vorbelichtung	31
4.4.1.1 mittels Halogen-Polymerisationslampe.....	31
4.4.1.2 mittels „weiß“-strahlender LED	33
4.4.2 automatisch regulierte Vorbelichtung.....	35

5. Ergebnisse.....	40
5.1 Spannungen nach Applikation laut Herstellerangaben	40
5.2 Spannungen nach Anwendung der Schichttechnik	41
5.3 Spannungen nach konstanter Vorbelichtung	42
5.4 Spannungen nach Variation der Vorbelichtung	43
5.5 Spannungen nach automatischer Vorbelichtung	44
5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und statistische Auswertung	46
6. Diskussion.....	48
6.1 Diskussion der Methode	48
6.2 Diskussion der untersuchten Bulk-Fill Komposite.....	51
6.3 Diskussion der Ergebnisse	53
6.3.1 Diskussion der Bulk-Fill Applikation	53
6.3.2 Diskussion der Schichttechnik	53
6.3.3 Diskussion der Applikation unter Vorbelichtung.....	54
6.3.4 Das 4-Phasen-Modell	59
6.4 Diskussion der Technischen Umsetzung und der Vorgehensweise bei der Entwicklung einer neuen Applikationstechnik	60
7. Zusammenfassung	63
7.1 Zusammenfassung (deutsch)	63
7.2 Abstract (English).....	65
8. Veröffentlichungen	67
9. Literaturverzeichnis.....	68
10. Materialverzeichnis.....	79
11. Danksagung	80
12. Verzeichnis der akademischen Lehrer	81
13. Anhang.....	82

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
Abb.	Abbildung
Bis-GMA	Bisphenolglycidylmethacrylat
C-Faktor	Konfigurationsfaktor
cm	Centimeter
CQ	Campherchinon
DIN	Deutsches Institut für Normierung
E-Modul	Elastizitätsmodul
LED	Englisch: Light-emitting diode, deutsch: Leuchtdiode
mA	Milliampere
min	Minuten
mm	Millimeter
MPa	Mega Pascal
mV	Millivolt
mW	Milliwatt
nm	Nanometer
s	Sekunden
SDR®	Smart Dentin Replacement
UDMA	Urethandimethacrylat
UV	Ultraviolett
V	Volt

1. Einleitung und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Beim Legen einer Kunststoff-Füllung dreht der Zahnarzt die OP-Leuchte weg oder reguliert die Lichtintensität herunter. Man möchte ja nicht, dass das Komposit aushärtet, bevor man mit der Modellation der Füllung zufrieden ist. Es gibt sogar Studien über Filtersysteme , welche unter die OP-Leuchte montiert werden können, damit sie den Blauanteil aus dem Licht filtern und die Ausleuchtung des Mundes nicht zu einer vorzeitigen Polymerisation des Kunststoffes führt (*Althaus* 2008). Diese Tatsache kennt jeder Zahnmediziner. Aber lichthärtendes Komposit schon gezielt Belichten, während man es noch appliziert?

„Wenn eine Idee nicht zuerst absurd erscheint, taugt sie nichts.“

(Albert Einstein)

Die meistverwendeten Füllungsmaterialien heutzutage sind zahnfarbene Komposite. Physikalische und optische Eigenschaften wurden durch die intensive Forschung auf diesem Gebiet zwar in den letzten Jahrzehnten stetig verbessert; es gibt jedoch immer noch eine entscheidende Herausforderung bei der Anfertigung einer solchen Füllung: die Etablierung eines dauerhaft adhäsiven Verbunds der Füllung zum Zahn. Das zentrale Problem hierbei ist die Polymerisationsschrumpfung des Komposits. Es wurden Generationen von Adhäsiv-Systemen entwickelt, um die Füllung suffizient an die Kavitätenwände „kleben“ zu können. Wenn die Schrumpfkraft die Adhäsionskräfte übersteigen, resultieren Randspalten durch Abreißen der Füllung. Sekundärkaries, verfärbte Ränder und postoperative Hypersensibilitäten sind unangenehme Folgen (*Rullmann et al.*, 2012). Selbst wenn die Adhäsionskräfte den Schrumpfkraften stand halten, resultieren schrumpfungsbedingte Spannungen (Stress) im Zahn, welche zu Schmelzrissen, Höckerauslenkungen

und –frakturen führen können. Daher ist man immer noch auf der Suche nach Möglichkeiten, die schrumpfungsbedingten Spannungen zu reduzieren.

Diese Dissertation beschäftigt sich nicht in erster Linie mit dem Vergleich von Methoden oder Materialien. Sie hat zum Ziel, ein neues Verfahren für die Applikation von Komposit zu entwickeln. Das Ziel dieses Verfahrens ist es, eine schnelle Kompositapplikation mit minimalen resultierenden Spannungen zu ermöglichen. Komposit schon beim Einfüllen zu Belichten ist die grundlegende Idee, welche hinter der neuen Applikationstechnik steckt. Das Komposit kann durch gleichzeitige Belichtung beim Einfüllen noch gut an die Kavitätenwand adaptieren, um dann sofort zu gelieren. In dieser Arbeit soll die Realisierbarkeit dieses Planes geprüft und genau das richtige Maß an Licht herausgefunden werden, um die Applikation möglichst praxistauglich zu gestalten.

Für unsere Versuche haben wir fließfähige Bulk-Fill Komposite benutzt, welche laut Herstellerangabe bis zu einer Schichtdicke von 4 mm aufgefüllt und gehärtet werden können. Diese Bulk-Fill Komposite sind in den letzten 4 Jahren sehr beliebt geworden, denn sie bedeuten eine Zeitersparnis gegenüber der aufwendigen Schichttechnik. Für herkömmliche Komposite gilt: Nur das Einbringen in kleinen Inkrementen (2 mm) gewährleistet einen guten Randschluss und eine adäquate Durchhärtung des Materials bis an den Boden der Kavität. Die Schichttechnik hat sich also sowohl für die Langlebigkeit der Füllungen als auch aus Gründen der Biokompatibilität (*Caughman et al.*, 1991) als Standard-Fülltechnik bewährt.

Es soll geprüft werden, ob die gleichzeitige Belichtung bei der Kompositapplikation eine reproduzierbare Verringerung der Schrumpfungsspannungen bewirkt; weiterhin soll ein Prototyp für diese Applikationsweise entwickelt werden. Diese Studie beschäftigt sich also auch mit der technischen Umsetzung der oben beschriebenen Applikationsmethode. Die resultierenden Spannungswerte werden mit den Werten verglichen, die für Block- und Schichtfüllungen aus denselben Materialien gemessen werden.

Dabei wurde die etablierte spannungsoptische Messmethode zur Ermittlung der Schrumpfungsspannungen verwendet.

2. Literaturbericht

2.1 Polymerisation von lichthärtenden Kompositen

Fast alle dentalen Komposite härten durch radikalische Polymerisation aus. Dazu enthalten sie entsprechende Initiatorsysteme, welche für den Start der Polymerisationsreaktion verantwortlich sind. Bei lichthärtenden Kompositen werden meist Campherchinon (CQ) als Fotoinitiator und tertiäre Amine als Koinitiatoren verwendet. Wird der Initiator mit Licht bestrahlt, dessen Wellenlänge in sein Absorptionsspektrum fällt, zerfällt er und bildet Radikale, welche die Polymerisationsreaktion starten. Bei dieser Reaktion werden zur Kettenverlängerung C=C-Doppelbindungen aufgespalten und neue Bindungen gebildet. Dadurch verkürzt sich der intermolekulare Abstand der Monomere, es resultiert die Polymerisationsschrumpfung.

Die Polymerisationsreaktion kann man in drei Phasen einteilen. Während der Verarbeitungszeit des Komposits und ganz zu Beginn der Belichtung werden die im Komposit enthaltenen Stabilisatoren aufgebraucht, welche eine vorzeitige Polymerisation verhindern. Dann setzt die erste Phase der Polymerisation ein: Die Pre-Gel-Phase. Hier sind die Monomere der Kompositmatrix noch dazu fähig, sich innerhalb der Matrix zu bewegen. Die Konsistenz ist fließfähig. Die zweite Phase ist die Gelphase (oder Gelpunkt). Hier sind bereits Makromoleküle entstanden, sodass die Bewegung der Monomere innerhalb der Matrix gehemmt wird. Die Monomere können bei fortschreitender Polymerisationsschrumpfung nicht mehr „nachfließen“. Die dritte Phase wird als Post-Gel-Phase bezeichnet, hier ist das Komposit nicht mehr plastisch verformbar, bei fortschreitender Schrumpfung. Dies ist die Phase, in der Polymerisationsschrumpfkraften als Stress an der Klebefläche Zahn – Komposit auftreten.

Für die Erzeugung blauen Lichtes zur Lichthärtung von Kompositen gibt es vier verschiedene Lampentypen: Die Halogen-, die LED-, die Plasma-

Polymerisationslampe und Lasersysteme. Die heute meist verwendeten LED-Lampen weisen einige Vorteile auf: sie sind in der kompakten Stift-Form deutlich praktischer als die sehr voluminösen und unhandlichen Halogenlampen, haben einen geringen Energieverbrauch und eine hohe Lebensdauer (*Jandt und Mills*, 2013). LED-Polymerisationslampen sind in ihrem Emissionsspektrum sehr gut dem Absorptionsspektrum des Photoinitiators CQ angepasst (*Stahl et al.*, 2000). Häufig wurden die physikalischen Eigenschaften nach Halogen- bzw. LED-Lichthärtung miteinander verglichen, wobei keine Nachteile durch die LED-Lichthärtung gezeigt werden konnten (*Jandt et al.*, 2000; *Stahl et al.*, 2000; *Schattenberg et al.*, 2008).

2.2 Schrumpfungsbedingte Spannungen

Die Polymerisationsschrumpfung des Komposits während seiner Aushärtung ist zwar die Ursache für die Gefahr von Debonding und Randspaltbildung, die Bestimmung der Polymerisationsschrumpfung ist jedoch nur von untergeordneter klinischer Relevanz. Klebt man nämlich die Kompositfüllung in eine Kavität ein, bestimmen nicht nur der Betrag der Volumenschrumpfung, sondern auch andere Faktoren wie z.B. die Elastizität des Komposits (E-Modul) die Schrumpfkraft, welche auf den adhäsiven Verbund zwischen Zahn und Restauration wirken. Daher definieren *Rullmann et al.* (2012) die Polymerisationsschrumpfkraft als Produkt aus der Polymerisationsschrumpfung und dem E-Modul des Materials. Übersteigen diese Schrumpfkraft die Haftkraft des Adhäsiv-Systems, so resultiert ein Abriss der Füllung und es entstehen Randspalten. Ist die Haftkraft größer als die Schrumpfkraft, verursachen diese im Kavitätenmaterial mechanische Spannungen bzw. Stress. Da diese Spannungen in der vorliegenden Studie gemessen werden, wird in den folgenden Kapiteln immer von „schrumpfungsbedingten Spannungen“ oder „Stress“ die Rede sein. Wichtige stressbestimmende Faktoren sind also die Materialeigenschaften des Komposits Volumenschrumpfung und E-Modul. Ebenfalls wichtige Parameter sind die Kavitätengeometrie (Volumen der

Kavität, C-Faktor), die Applikationstechnik des Komposits sowie die Art der Lichtpolymerisation. Das Ausmaß des Schrumpfstresses entscheidet maßgeblich über den Erfolg oder Misserfolg einer Kompositrestauration, weshalb allgemein ein sehr großes Interesse an einer möglichst geringen Stressentwicklung besteht.

2.3 Das Gradientenmodell

Das Gradientenmodell wurde 1999 durch *Sommer* und *Gente* beschrieben. Es beschreibt, wie die Richtung der Polymerisationsschrumpfung durch die Richtung der Bestrahlung verändert und gesteuert werden kann. Definiert man die Lichtdosis D als Produkt der Lichtintensität I und der Bestrahlungsdauer Δt , die zur vollständigen Aushärtung einer Kompositprobe mit der Dicke ΔX_0 nötig ist, so ergibt sich :

$$D = I \Delta t$$

Ist nun die Dicke einer Kompositprobe $\Delta X > \Delta X_0$, so härtet nicht die gesamte Kompositprobe gleichzeitig aus, sondern nur die lichtzugewandte Schicht mit der Dicke ΔX_1 . Dabei sollte gemäß dem Lambert-Beer-Gesetz ein Abfall der Lichtintensität I resultieren, der sich durch folgende Gleichung beschreiben lässt:

$$I = I_0 e^{-\lambda \Delta X}$$

Dabei stellt I_0 die Lichtintensität vor Eintritt in die Probe dar, λ den Absorptionskoeffizienten des Materials und ΔX die Dicke der Probe. Da zunächst nur die lichtzugewandte Schicht ΔX_1 vollständig polymerisiert, kommt es zur Ausbildung eines temporären Härtegradienten aus drei unterschiedlichen Phasen des Komposits: Neben der vollständig polymerisierten Schicht ΔX_1 auf der lichtzugewandten Seite existiert in Richtung des Lichtabfalls eine zweite Schicht, die Zwischenphase ΔX_2 , welche gelartig ist (noch nicht hart, aber auch nicht mehr fließfähig) sowie eine Schicht ΔX_3 , welche noch fließfähig ist.

Der Übergang der drei Phasen ineinander ist fließend. Dabei ergibt die Addition der 3 Phasen die Gesamtdicke der Probe:

$$\Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 = \Delta X$$

Dieses Gradientenmodell oder Dreiphasenmodell stellte *Nötzel* 2008 in einem Schema dar:

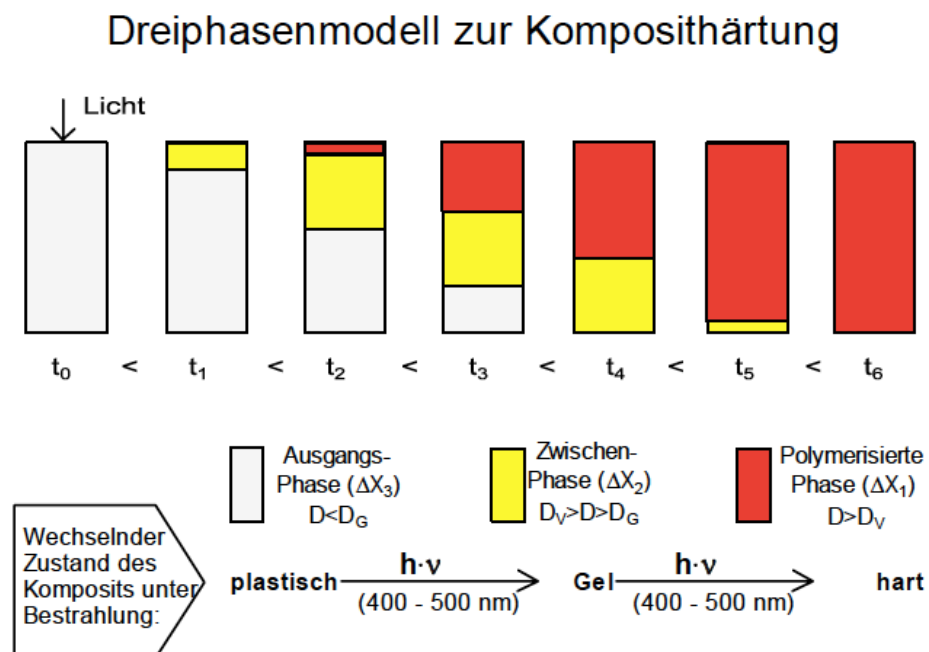


Abb. 2.3-1: Schematische Darstellung des Gradientenmodells (aus Dissertation Nötzel, 2008)

Den Einfluss der Bestrahlungsrichtung bei Vorliegen eines Härtegradienten zeigten *Sommer* und *Gente* mit einem speziellen Dilatometer. Dabei wurde eine Kompositprobe zwischen einen Glasblock und einem parallel dazu angebrachten, auslenkbaren Glasstreifen gebracht. Durch eine Messuhr konnte der Schrumpf in derjenigen Richtung gemessen werden, die die beiden Glasproben verbindet. Wird die Kompositprobe nun zu der Zeit t_0 aus einer Richtung A, welche parallel zur Messrichtung liegt, mit einer Lichtdosis D

bestrahlt, die zur Ausbildung eines Härtegradienten führt, so ist so lange kein Schrumpf in dieser Richtung messbar, wie die fließfähige Phase ΔX_3 existiert (bis einschließlich t_3 in Abb. 2.3-1). Diese Phase gleicht den Polymerisationsschrumpf der Phasen ΔX_1 und ΔX_2 aus, wobei der größte Anteil des Schrumpfes in der Gelphase des Komposits erzeugt wird. Erst, wenn die Phase ΔX_3 nicht mehr vorhanden (geliert) ist (ab t_4), kann ein Schrumpf gemessen werden. Wird dagegen die Bestrahlungsrichtung senkrecht zur Messrichtung gewählt, so ist sofort mit Beginn der Bestrahlung ein Schrumpf messbar, da sich eine „Kompositbrücke“ zwischen den beiden Glasflächen bildet. Die Schrumpfreduktion durch Bestrahlen parallel zur Messrichtung ist abhängig von der Transluzenz des Komposits. So ist die Schrumpfreduktion für opake Komposite größer als für transluzente Komposite, da bei ihnen durch größeren Lichtintensitätsabfall eine im Verhältnis dickere Phase ΔX_3 entsteht. Als weiteres Ergebnis dieses Versuchs stellte sich heraus, dass bei Erfüllung der Bedingung ΔX (Probendicke) $>$ ΔX_2 (Gelphase) und Erstbelichtung in Messrichtung der lineare Schrumpf unabhängig von der Probendicke war. Daher vermuteten *Sommer* und *Gente*, dass „die Dicke der schrumpfbestimmenden Gelphase“ des von ihnen verwendeten Komposits „im untersuchten Bereich den Charakter einer von der Probendicke unabhängigen Materialkonstanten“ hatte. Basierend auf dem Gradientenmodell stellten *Sommer* und *Gente* eine neue Möglichkeit zur Kontrolle der Polymerisationsschrumpfung vor: Die Verwendung von Licht-Inserts, welche in die unausgehärtete Füllung eingebracht werden und „über die das Komposit aus einer günstigen Richtung, nämlich aus dem Innern der Füllung heraus, bestrahlt werden kann“. Dass der Einsatz von Licht-Inserts den aus der Polymerisationsschrumpfung resultierenden Polymerisationsstress signifikant reduziert, wurde von *Nötzel* (2008) nachgewiesen und von *Stoll et al.* (2007) am extrahierten Zahn bestätigt.

2.4 Konventionelle Techniken zur Spannungsreduktion

Es haben sich verschiedene Techniken zur Verarbeitung von Komposit etabliert, um die Folgen der Polymerisationsschrumpfung möglichst gering zu halten. So ist es heute absoluter Standard, zur Spannungsreduktion das Komposit in kleinen Schichten von maximal 2 bis 3 mm einzubringen bzw. aufzutragen und zu härten. Dies hat zwei Gründe: Erstens kann der C-Faktor der Inkremente beeinflusst werden, sodass geringere Spannungen entstehen. Zweitens ist auch eine Durchhärtung der Inkremente gesichert. Der C-Faktor beschreibt das Verhältnis von geklebter (gebundener) zu freier (ungebundener) Oberfläche des Komposit-Inkrementes:

$$C - Faktor = \frac{\text{gebundene Fläche}}{\text{ungebundene Fläche}}$$

Es herrscht die allgemeine Annahme, dass der auftretende Polymerisations-schrumpfstress umso größer ist, je größer der C-Faktor ist.

Nikolaenko et al. untersuchten 2004 den Einfluss des C-Faktors und verschiedener Schichttechniken auf die Ausbildung eines Haftverbundes zum Dentin. So ist ein hoher C-Faktor laut *Nikolaenko et al.* (2004) eine Gefahr für ein Abreißen des Komposits von der Zahnhartsubstanz. Einige Autoren beschrieben, dass es bei Anwendung der Schichttechnik und einem Universalkomposit zu signifikant geringeren Auslenkungen der Zahnhöcker kommt als bei Anwendung der Bulk-Technik. (*Park et al.*, 2008; *Kwon et al.*, 2012). Die sogenannte Schichttechnik ist aber nicht als einheitlicher Begriff zu verstehen, denn die Art und Weise, wie die einzelnen Inkremente in zum Beispiel eine große Kavität eingebracht werden, kann auf verschiedene Weisen durchgeführt werden. So gibt es die horizontale Schichttechnik, bei der die Inkremente von ca. 2 mm Dicke horizontal vom Boden der Kavität bis zur Kaufläche geschichtet werden. Diese Technik ist laut *Nikolaenko et al.* (2004) eine vielversprechende Methode, um einen guten Haftverbund zum Kavitätenboden zu erzielen. Die vertikale Schichttechnik (Inkremente werden schrittweise vertikal von einer Kavitätenwand zur gegenüberliegenden Wand

einggebracht) wurde in dieser Studie ebenfalls untersucht und schnitt im Vergleich mit der horizontalen Schichttechnik schlechter ab, genau so die diagonale Schichttechnik. Bei der diagonalen Schichttechnik wird oft das erste Inkrement horizontal auf den Boden der Kavität gebracht, und dann immer ein diagonales Inkrement, das nur an einer der Kavitätenwände anliegen soll, dazu. Zahlreiche Studien beschäftigten sich mit der Frage, welche Verarbeitungstechnik denn nun die Beste sei. Es gibt klinische Studien, in denen keine signifikanten Unterschiede in der Höckerauslenkung bei Anwendung der horizontalen Schichttechnik verglichen mit der diagonalen Schichttechnik festgestellt werden konnten (*Park et al.*, 2008). *Oliveira et al.* (2013) konnten zwar verschiedene Spannungsmuster bei Vergleich der beiden Schichttechniken beobachten, jedoch auch keine Unterschiede in den Spannungs-Messwerten. Eine weitere, neuere Methode zur Reduktion von polymerisationsbedingten Spannungen ist die Verwendung von fließfähigen Kompositen (Flowables) als Kavitäten-Liner bzw. –basis. Da Flowables ein niedrigeres E-Modul aufweisen als stopfbare Komposite, entstand der Ansatz sie in einer dünnen Schicht unter das stopfbare Komposit einzubringen, dabei sollen sie als „Stressbreaker“ fungieren. Dass dies klinisch jedoch nicht funktioniert, wurde mehrfach gezeigt (*Kwon et al.*, 2012; *Oliveira et al.*, 2010). Trotzdem dient die Verwendung fließfähiger Komposite als Kavitätenliner der besseren Aushärtung des Adhäsivs und der besseren Benetzbarkeit der Kavitätenwand. Neben den verschiedenen Applikationsmöglichkeiten von Komposit wurde viel an einer veränderten Licht-Polymerisation als Möglichkeit den auftretenden Stress zu reduzieren, geforscht. So wurde Anfang des Jahrtausends, mit Aufkommen der LED-Polymerisationslampen, die sogenannte Softstart-Polymerisation als Möglichkeit zur Verbesserung der marginalen Adaptation des Komposits publiziert (*Mehl et al.*, 1997; *Hofmann et al.*, 2003). Bei der Softstart-Polymerisation wird nicht sofort die volle Lichtintensität auf die Füllung gegeben, sondern zunächst kurzzeitig eine geringe Lichtintensität (z.B. 10 s mit 150 mW/cm^2) und anschließend wird die Lichtintensität auf volle Leistung gesteigert (z.B. 30 s mit 550 mW/cm^2). *Ernst et al.* (2003) hielten jedoch fest, dass der Effekt der Softstart-Polymerisation von

dem verwendeten Komposit abhängt. *Cunha et al.* (2008) beobachteten nur für einen hohen C-Faktor von 3 eine Spannungsreduktion durch Softstart-Polymerisation, dies auch nur in sehr geringem Ausmaße. *Visvanathan et al.* (2007) konstatierten keinen überragenden Vorteil in der Anwendung der Softstart-Polymerisation.

Eine andere Methode ist die Anwendung einer sogenannten Intervall-Belichtung. Hierbei wird ebenfalls zunächst für 5 bis 10 s mit einer kleinen Lichtintensität bestrahlt, dann wird eine Belichtungspause (für einige Sekunden bis 3 Minuten) eingelegt und dann für 30 bis 60 s mit voller Intensität gehärtet. Die genauen Intensitätswerte und Zeiten variieren für diese Intervall-Belichtungstechnik zwischen den verschiedenen Studien. In diesen Studien wurden häufig signifikant geringere Spannungswerte bzw. bessere Randadaptation des Komposits für die Intervall-Belichtung gemessen (*Yoshikawa et al.*, 2001; *Cunha et al.*, 2008), die Spannungsreduktion war dabei sehr variabel zwischen ca. 10 und 50 %. Es gibt jedoch auch kritische Meinungen, die diese geringeren Spannungswerte auf einen geringeren Konversionsgrad durch die Intervall-Belichtung zurückführen. Dies erscheint jedoch wenig realistisch (siehe Kap. 6.3.3).

2.5 Trend zur Blockfüllung

In den letzten 4 Jahren zeichnete sich auf dem Gebiet der dentalen Komposite ein neuer Trend ab. Das innovative Bulk-Fill Komposit „Smart Dentin Replacement“ (kurz „SDR®“, Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland) kam 2010 auf den Markt und schon bald produzierten auch andere namhafte Dentalkomposit-Hersteller ein eigenes Bulk-Fill Pendant. Seither erfreuen sich diese sogenannten „Bulk-Fill Flowables“ großer Beliebtheit. „Bulk-Fill“ bedeutet, dass man den unteren Teil einer großen Kavität bis zu einer Schichtstärke von 4 mm auffüllen und härten darf. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich also von der bisher allgemein gültigen Regel, dass Komposit nur in kleinen Schichtstärken von 2 mm eingebracht und gehärtet werden darf. Damit

bedeutet die Bulk-Fill Technik eine Zeitersparnis gegenüber der klassischen Schichttechnik. Diese erhöhte Schichtstärke hat dabei laut Hersteller keinen negativen Einfluss auf die Randqualität dieser Füllungen, was auch mehrfach in der Literatur beschrieben wurde (*Frankenberger 2011; Roggendorf et al., 2011; Moorthy et al., 2012; Campos et al., 2014*). Da diese Komposite schlechtere physikalische Eigenschaften in Bezug auf die Abrasion und die Festigkeit aufweisen als die konventionellen Komposite, sind die niedrigviskösen Bulk-Fill Materialien nur für das Auffüllen der unteren 4 mm einer Kavität zugelassen. Auf diese Basis wird eine Deckfüllung aus einem Universal- oder Seitenzahnkomposit geschichtet. Um eine Bulk-Füllung mit nur einem Material zu ermöglichen, wurden sogenannte hochvisköse Bulk-Fill Materialien mit besseren physikalischen Eigenschaften entwickelt, welche auch bis 4 mm Schichtstärke polymerisiert werden können und die eine Füllung einschließlich der Kaufläche erlauben. Die chemische Zusammensetzung der Bulk-Fill Materialien und damit die physikalischen Eigenschaften variieren dabei zwischen den einzelnen Herstellern. Auf die speziellen physikalischen Eigenschaften der beiden in dieser Studie untersuchten Komposite SDR® und x-tra base soll im Kapitel 6.2 näher eingegangen werden. In Tabelle 2.5-1 ist eine Auflistung einiger derzeit auf dem Markt befindlicher Bulk-Fill Komposite dargestellt.

Hersteller	Niedrigvisköse Bulk-Fills	Hochvisköse Bulk-Fills
Dentsply DeTrey	SDR®	Quixfil
Heraeus Kulzer	Venus® Bulk Fill	
3M ESPE	Filtek™ Bulk Fill	
VOCO	x-tra base	X-tra Fil
Ivoclar Vivadent		Tetric EvoCeram® Bulk Fill
Kerr		SonicFill™

Tabelle 2.5-1: Eine Übersicht über derzeit erhältliche Bulk-Fill Komposite.

Der Ansatz, den ungewünschten Polymerisationsstress durch eine Reduktion der Polymerisationsschrumpfung zu verringern, führte in der Vergangenheit zu keinen bahnbrechenden Ergebnissen. Denn sobald man den Fülleranteil eines Kompositmaterials erhöht, verringert sich zwar die Polymerisationsschrumpfung, gleichzeitig erhöht sich aber die Rigidität des Komposits (E-Modul) und führt damit wieder zu einer höheren Spannungsentwicklung (*Rullmann et al.*, 2012). So gab es bei der SDR®-Technologie den neuen Ansatz, durch eine veränderte Monomer-Chemie den auftretenden Stress an dem Interface Zahn-Restauration zu verringern. Dies gelang im Beispiel SDR® mithilfe eines Polymerisationsmodulators, welcher in das Harzgerüst der Monomere eingebaut wurde. SDR® und x-tra base verwenden unterschiedliche Monomer-Systeme: So basiert SDR® auf Urethandimethacrylat (UDMA), x-tra base dagegen auf Bisphenolglycidylmethacrylat (Bis-GMA). Die Bulk-Fill Flowables versprechen außerdem durch verbesserte Fließeigenschaften eine sehr gute Adaptation an die Kavitätenwand. Für die Ermöglichung einer erhöhten Aushärtungstiefe der Bulk-Fill Materialien sind die Transluzenz, Füllermenge und -größe sowie die zugesetzten Photoinitiatoren entscheidende Faktoren, wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt. Daher sind die Bulk-Fill Materialien alle transluzent und auch hell in der Farbe eingestellt (*Frankenberger* 2011). In den zugesetzten Photoinitiatoren unterscheiden sie sich teilweise. So enthalten einige der Bulk-Fill Materialien nur den klassischen Photoinitiator Campherchinon. Einige Bulk-Fills sind jedoch, zum Beispiel bei geringerer Transluzenz und kleineren Füllpartikeln, mit einem zusätzlichen Photoinitiator ausgestattet um eine entsprechende Aushärtungstiefe zu erreichen (z. B. Ivocerin in Tetric EvoCeram® Bulk Fill). Die Füllermenge und -größe unterscheidet sich ebenfalls deutlich zwischen den einzelnen Bulk-Fill Materialien. Es gibt auch Eigenschaften der Bulk-Fill Komposite, die kritisch betrachtet werden könnten, wie zum Beispiel das geringe E-Modul. So beschrieben *Asmussen* und *Peutzfeld* 2008, dass okklusionstragende Füllungen ein hohes E-Modul aufweisen sollten, da dies den marginal auftretenden Stress und Verschleiß reduziere. Insgesamt sind jedoch

überwiegend positive Berichte über die Resultate der Anwendung von Bulk-Fill Materialien veröffentlicht worden.

2.6 Polarisiertes Licht

Zum besseren Verständnis des in Kapitel 3.2.1 beschriebenen spannungs-optischen Versuchsaufbaus soll hier auf polarisiertes Licht eingegangen werden, welches eine wichtige physikalische Grundlage der Spannungsoptik darstellt.

Licht wird in der Physik als transversale elektromagnetische Welle beschrieben. Daher kann es, wie alle transversalen Wellen, polarisiert werden. Der elektrische Feldvektor E und der magnetische Feldvektor B stehen senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Ebene des E -Vektors wird als Schwingungsebene, die Ebene des B -Vektors als Polarisationssebene bezeichnet (Haas 2012). Die Schwingungsrichtung des E -Vektors gilt häufig als Polarisationsrichtung. Licht, wie es z.B. von einer Glühlampe ausgeht, ist unpolarisiert. Das heißt, die Schwingungsrichtungen sind in der zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes senkrechten Ebene gleichmäßig verteilt. In linear polarisiertem Licht schwingt der E -Vektor in nur einer einzigen Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

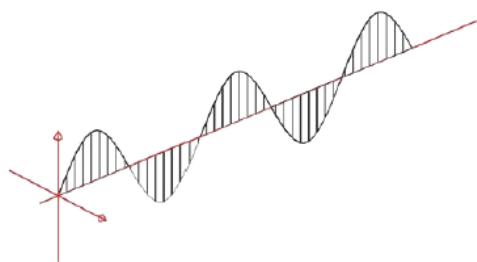


Abb. 2.6-1: Linear polarisierte Welle (Abbildung aus Dissertation Klingler, 2004)

Zwei linear polarisierte Wellen E_1 und E_2 mit gleicher Wellenlänge, deren Schwingungsebenen senkrecht aufeinander stehen, können sich überlagern.

Durch die Addition der Vektoren ergibt sich die resultierende Schwingungsebene.

Wenn die Phasenverschiebung nun $\Delta\varphi = \frac{\lambda}{4}$ beträgt, so entsteht eine zirkular polarisierte Welle $E_z = E_1 + E_2$.

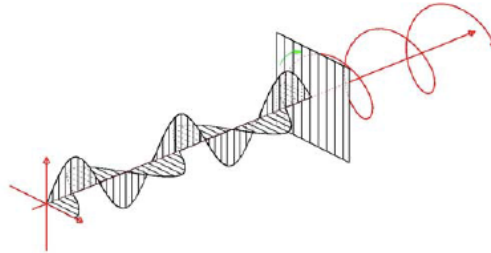


Abb. 2.6-2: Durch Überlagerung von E_1 und E_2 , welche phasenverschoben sind, entsteht eine zirkular polarisierte Welle (Abbildung aus Dissertation Klingler, 2004).

3. Material und Methode

3.1 Versuchsmaterialien

Die Untersuchung und Erprobung der neuen Verarbeitungstechnik für Komposit wurde mit zwei verschiedenen lichthärtenden Bulk-Fill Flowables durchgeführt: „Smart Dentin Replacement“, kurz SDR®, der Firma Dentsply DeTrey (Konstanz, Deutschland) und das Material x-tra base der Firma VOCO (Cuxhaven, Deutschland). Diese beiden Komposite haben ihre Indikation laut Herstellerangabe vor allem als Block-Basisfüllung in großen Zahnkavitäten (mit Deckfüllung aus einer mindestens 2 mm dicken Schicht eines Universal- oder Seitenzahnkomposits). Sie können aber auch als Liner unter größeren Kompositfüllungen, zur erweiterten Fissurenversiegelung, für kleine Klasse I-Kavitäten und für Zahnhalsfüllungen verwendet werden. Die beiden Materialien sind in vordosierten Compulen erhältlich. Dies war für die technische Durchführung der Hauptversuche eine wichtige Voraussetzung, denn für die automatische Beleuchtung wurde die Leuchtdiode an einer mit der Elektronik versehenen Applikationspistole angebracht. So konnte nach Benutzung die leere Compule gegen eine neue ausgetauscht werden. Die benutzten Materialien sind mit allen methacrylatbasierten Bondings und –kompositen kombinierbar. Das in allen Versuchen benutzte Material zur Kavitätenvorbehandlung war das lichthärtende Einkomponenten-Bonding Solobond M, Firma VOCO (Cuxhaven, Deutschland). Dieses ist acetonhaltig, kann so in die Oberfläche der Versuchskavitäten aus Araldit B penetrieren und einen adhäsiven Verbund des Füllungskomposits zur Kavitätenwand gewährleisten. Dieses Vorgehen wurde aus den bereits abgeschlossenen Dissertationen *Nötzel* und *Klingler* übernommen. In dieser Studie sollen die Spannungen im Kavitätenmaterial untersucht werden, die sich bei Anwendung der neuen Vorbelichtungs-Technik ergeben, verglichen mit der Schichttechnik und der Blockfüllung. Hierfür wären herkömmliche Flowables als Versuchsmaterialien ungeeignet gewesen, denn diese haben deutlich höhere Schrumpfungswerte als die Bulk-Fill Flowables und sind vom Hersteller nicht für Blockfüllungen

freigegeben. Daher wurden zwei Bulk-Fill Flowables für die Studie ausgewählt. Für das Material x-tra base wird laut Hersteller eine Mindestpolymerisationszeit von 10 s (in der Universalfarbe) bzw. 20 - 40 s (in der Farbe A2; je nach Leistung der Polymerisationslampe) empfohlen. In dieser Studie wurde die Universalfarbe verwendet. Für das Material SDR® (Universalfarbe) sind 20 s Mindestpolymerisationszeit empfohlen. Um eine vollständige Polymerisation zu gewährleisten und um die Polymerisationsbedingungen einheitlich zu gestalten, wurden beide Komposite insgesamt 60 s gehärtet.

3.1.1 Lichtempfindlichkeit der untersuchten Materialien im Vergleich

Für die Entwicklung der Vorbelichtungs-Methode ist die Lichtempfindlichkeit eine entscheidende Eigenschaft der Versuchskomposite. Daher wurde eine orientierende Untersuchung der Aushärtungstiefen von SDR® und x-tra base (in Anlehnung an ISO 4049) vorgenommen, um die Lichtempfindlichkeit und damit die Ergebnisse aus den Versuchen der Kompositapplikation unter Vorbelichtung besser einschätzen zu können. Dazu wurde ein lichtundurchlässiges Röhrchen, welches an seinem Boden durch ein Glasplättchen verschlossen und an der Oberseite offen war, mit dem zu untersuchenden Komposit aufgefüllt. Das Röhrchen wurde so unter einer Messuhr eingespannt, dass die Kompositprobe durch den Glasboden hindurch belichtet werden konnte. An der Oberseite des Röhrchens konnte ein Stab so weit in die Probe eintauchen, wie das Komposit noch weich war. Dieser Stab war mit der Messuhr verbunden, so dass diese die jeweilige Dicke der festen Kompositschicht anzeigte. Die Aushärtung erfolgte mit einer LED-Polymerisationslampe (Celalux, VOCO, Cuxhaven). Es ist erkennbar, dass die Aushärtungstiefen beider Komposite bei logarithmischer Skalierung der Abszisse im untersuchten Bereich einem positiv linearen Zusammenhang folgen (Abb. 3.1.1-1). Dieser Zusammenhang der Aushärtungstiefe und der applizierten Lichtdosis wurde bereits 2010 von *Baier et al.* publiziert: „Bei jeder Verdoppelung der Belichtungszeit wird ein konstanter Zuwachs an

Aushärtungstiefe gemessen.“ Bei Extrapolation der beiden logarithmischen Regressionsgeraden fällt auf, dass diese geringfügig unterschiedliche Steigungen besitzen und bei einer Belichtungszeit von ca. 5 s kreuzen.

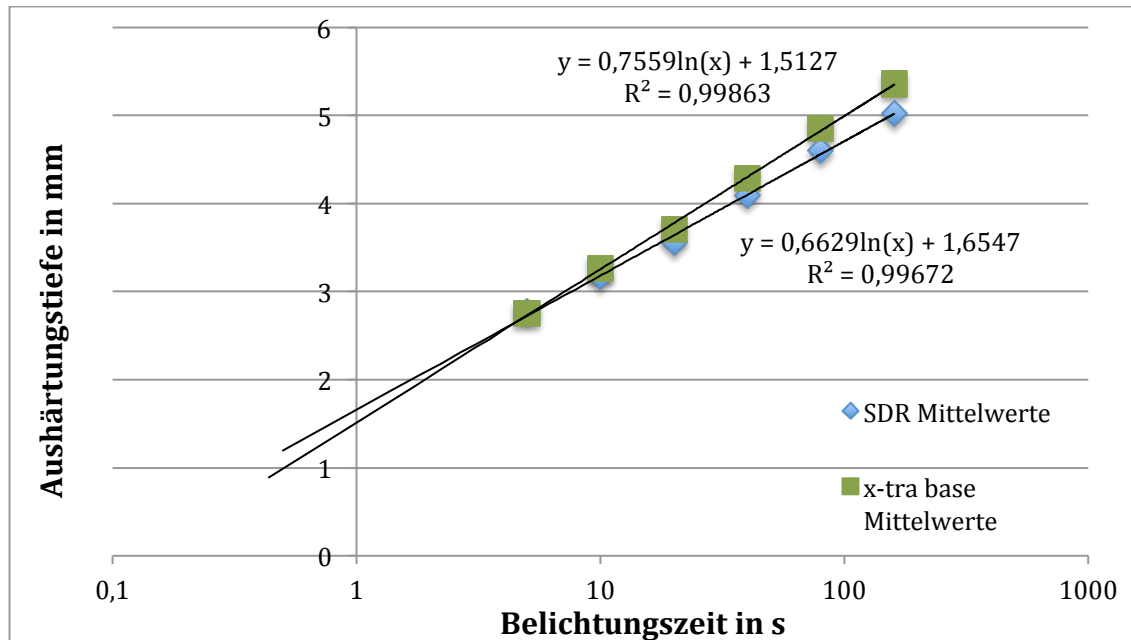


Abb. 3.1.1-1: Aushärtungstiefen von SDR und x-tra base (in Anlehnung an ISO 4049). Die Belichtungszeit in s wurde logarithmisch aufgetragen. Bei Extrapolation der logarithmischen Regressionsgeraden fällt auf, dass SDR initial (also bei einer Belichtungszeit < 5 s) eine geringfügig höhere Aushärtungstiefe aufweist.

3.2 Spannungsmessung

Der Spannungsoptische Versuchsaufbau ist von Klingler und Gente entwickelt und von *Klingler* (2004) ausführlich beschrieben worden. Hier soll ein Überblick über die gesamte Versuchsdurchführung und die Funktionsweise der Spannungsoptik gegeben werden.

3.2.1 Spannungsoptischer Versuchsaufbau

Für die Messung wurde rotes Licht ($\lambda = 635 \text{ nm} \pm 25 \text{ nm}$) verwendet, welches nicht in das Absorptionsspektrum der in den Kompositen enthaltenen Photoinitiatoren (beispielsweise CQ mit $\lambda = 440 - 480 \text{ nm}$) fällt. So ist gewährleistet, dass das zur Messung benutzte Licht keinen Einfluss auf die Polymerisation der untersuchten Proben hat. Da diese Lichtquelle punktförmig ist, werden die Lichtwellen zunächst durch eine Linse (Kondensor) parallelisiert. Dann passiert es den Polarisator. Dies ist ein Filter, der nur Wellen mit einer bestimmten Polarisationsrichtung hindurch lässt. Nachgeschaltet ist eine $\lambda/4$ -Platte, welche eine Schwingungsebene des Lichtes um genau ein Viertel der Wellenlänge verschiebt. Wenn diese Platte im 45° -Winkel zur Polarisationssebene angeordnet ist, erzeugt man zirkular polarisiertes Licht. Dieses Licht tritt durch eine Platte aus Araldit B, einem durchsichtigen Epoxidharz, in das die Versuchskavitäten eingefräst sind, hindurch. Das Araldit B besitzt eine sehr kleine spannungsoptische Konstante, d.h. mechanische Spannungen im Araldit B wirken besonders doppelbrechend auf das zirkular polarisierte Licht. Dies bewirkt eine Phasenverschiebung der beiden Wellen. Nach Durchgang des Lichtes durch die Probe wird durch eine weitere $\lambda/4$ -Platte das zirkular polarisierte Licht zunächst wieder in linear polarisiertes Licht überführt. Dann wird durch einen Analysator, der genau so funktioniert wie der Polarisator, eine Schwingungsebene des linear polarisierten Lichtes herausgefiltert. Analysator und Polarisator waren auf gleiche Drehrichtung des Lichtes eingestellt. Hinter dem Analysator werden dann die Orte gleicher Spannung (bzw. eigentlich gleicher Hauptspannungsdifferenz) als helle und dunkle Linien, sogenannte Spannungslinien oder Isochromaten, sichtbar. Diese Isochromaten kann man als eine Art „Höhenlinien“, wie man sie aus Landkarten kennt, verstehen. Die Höhe des Geländes entspricht in diesem Vergleich der Verspannung des Kavitätenmaterials. Das Bild der Isochromaten wird von einer Schwarz-Weiß-Kamera aufgenommen und auf einen Fernsehbildschirm weitergeleitet. Außerdem ist eine Stoppuhr in das Bild eingeblendet.

Der gesamte Prozess des Compositeinfüllens und Aushärtens wird für mindestens 1000 s nach Start mit einem Videorecorder aufgezeichnet.

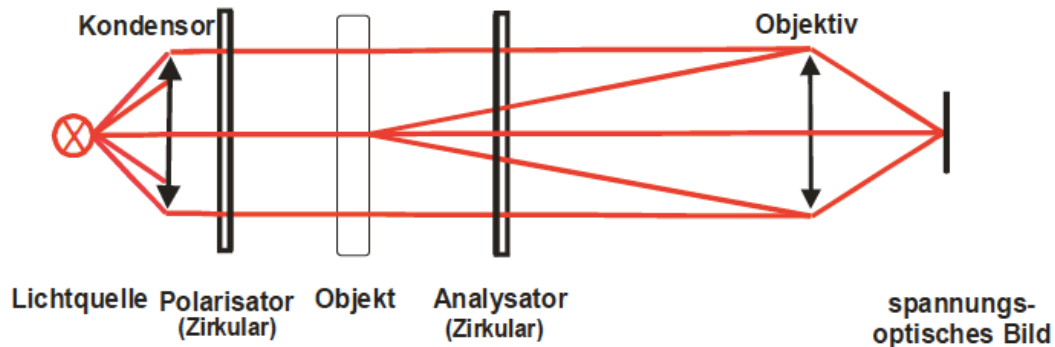


Abb. 3.2.1-1: Versuchsaufbau mit Strahlengang. Polarisator und Analysator enthalten neben dem Polarisations-Filter für linear polarisiertes Licht auch die erforderliche $\lambda/4$ – Platte (aus Dissertation Klingler, 2004).

3.2.2 Modellkavitäten

Als Kavitätenmaterial kamen die schon von *Klingler* und *Nötzel* verwendeten Araldit B - Platten zum Einsatz, in die jeweils 4 Kavitäten mit Abmessungen von 5 x 5 x 5 mm eingefräst wurden:

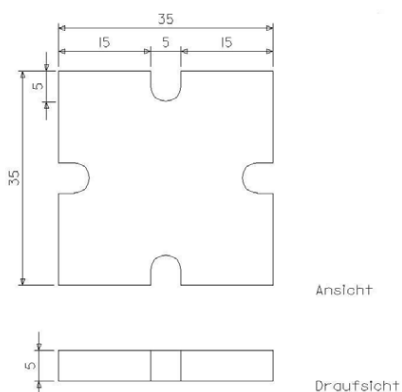


Abb. 3.2.2-1: In Araldit B-Platten sind jeweils 4 Versuchskavitäten eingefräst. Die Maße sind in mm angegeben (Bild aus Dissertation Klingler).

Das Material Araldit B wurde von der Firma Tiedemann (Garmisch-Patenkirchen) bezogen und die Kavitäten wurden von den Feinmechaniker-

meistern der Philipps-Universität Marburg in den entsprechenden Abmessungen hineingefräst.

Das Epoxidharz Araldit B hat eine sehr kleine spannungsoptische Konstante und man kann daher mechanische Spannungen in diesem Material sehr gut sichtbar machen. Die Kavitäten haben eine Tiefe von jeweils 5 mm, davon die oberen 2,5 mm mit geraden Wänden und die unteren 2,5 mm entsprechen in der Seitenansicht einer Kreisform. Es ergibt sich für die gesamte Kavität ein realistischer C-Faktor von 0,92 und ein Volumen von $V = 112 \text{ mm}^3$. Die Kavitäten wurden jedoch nur 4 mm hoch aufgefüllt, da diese Stärke der vom Hersteller empfohlenen maximalen Schichtstärke entspricht. Daher liegt für den gewählten Versuchsaufbau ein C-Faktor von 0,91 und ein Volumen von $V = 87 \text{ mm}^3$ vor. Die Platten wurden vor Benutzung gemäß dem von *Nötzel* vorgegebenen Temperatur-Zeitverlauf getempert, um Eigenspannungen des Materials nach Einfräsung der Kavitäten (sogenannter „Nulleffekt“) zu beseitigen und vollständig spannungsfreie Ausgangskavitäten zu erhalten.

3.2.3 Versuchsdurchführung und –dokumentation

Zunächst wurde jede Kavität mit Probennummer und Datum versehen und die Kavität für den adhäsiven Verbund zur Kompositfüllung vorbereitet. Dazu wurde sie mit einem diamantierten Schleifinstrument (Fa. Busch) angerauht, ausgepüstert und über ein dünnes Pinselchen mit Solobond M (VOCO, Cuxhaven) konditioniert. Nach 40 s Einwirkzeit wurde das Bonding Agent mit einer Halogen-Polymerisationslampe für 40 s ausgehärtet. Es war darauf zu achten, dass das Solobond M - Fläschchen noch nicht lange geöffnet war, da sonst wegen des hohen Dampfdrucks des Acetons soviel Aceton abdampfte, dass das Solobond M den Kavitätenkunststoff nicht mehr anlösen konnte. Füllungen, die mit einem solchen, schon länger geöffneten Bonding Agent verklebt wurden, rissen während des Polymerisationsvorganges ab und waren nicht auswertbar. Die seitlich offenen Flächen der Versuchskavitäten wurden

mit zwei dünnen Mikroskopierdeckgläschen (Fa. Kobe, Marburg), die mit Heliobond (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) temporär auf der Oberfläche der Araldit-Plättchen befestigt wurden, für den Füllungsprozess verschlossen. Dann wurden Probennummer, Füllungsmaterial, Datum eingeblendet und für jeweils 5 s auf dem Videoband aufgezeichnet. Danach wurde eine Stoppuhr eingeblendet, welche zeitgleich mit Beginn der Füllung gestartet wurde. Die Kavität wurde bis auf 4 mm mit der jeweils ausgewählten Applikationstechnik mit dem entsprechenden Flowable aufgefüllt, und aus drei verschiedenen Richtungen (von oben und von jeder Seite der Deckgläschen) jeweils 20 s belichtet. Dazu wurde eine Halogen-Polymerisationslampe (Translux, Fa. Kulzer, Wehrheim) benutzt, welche eine Bestrahlungsintensität von 600 mW/cm^2 aufweist (selbst gemessen, mit Broadband Power/Energy Meter (13 PEM001), Melles Griot, Rochester, NY, USA). Dass diese Bestrahlungsstärke nicht nachlässt, wurde in regelmäßigen Abständen kontrolliert, um eine unvollständige Aushärtung des Komposits sicher zu vermeiden. Denn ein Nachteil von Halogen-Polymerisationslampen ist, dass ihre Halogenbirne nach längerer Betriebsdauer einen deutlichen Leistungsabfall in ihrer Lichtintensität aufweist (*Jandt und Mills, 2013*). Tückisch ist, dass dieser Leistungsabfall leicht unbemerkt bleiben kann, da er für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. LED-Lampen dagegen weisen eine konstante Abgabeleistung über die gesamte Lebensdauer der Leuchtdioden auf (*Jandt et al. 2000*), jedoch kann eine LED-Polymerisationslampe nicht minutenlang eine konstante Lichtleistung erzeugen. Daher wurde der Versuch der „konstanten Vorpolymerisation“ mit einer Halogen-Polymerisationslampe durchgeführt. Über die Videoaufnahme des Füllungs- und Polymerisationsvorganges ist eine lückenlose Beurteilung der Spannungsentwicklung in der Kavität von Beginn bis 17 Minuten nach Füllung möglich. Die Bilder nach 1000 s wurden digitalisiert und archiviert. Weiterhin wurden sie am Computer vermessen und ausgewertet.

3.2.4 Versuchsauswertung

Die dokumentierten 1000 s - Bilder wurden an drei Stellen vermessen und ausgewertet, und zwar unten mittig sowie rechts und links am Übergang der geraden zur gekrümmten Kavitätenwand. Die Abb. 3.2.4-1 zeigt eine exemplarische Blockfüllung mit dem Material x-tra base. Mit dem Bildverarbeitungs-Programm Image J (RSB, USA) konnte der Abstand der hellen und dunklen Spannungsringe (der sogenannten Isochromaten) von der Kavitätenwand bestimmt werden. Dazu wurde die relative Helligkeit eines ausgewählten Ausschnittes bestimmt, welcher genau bei der Kavitätenwand beginnt (Kavitätenwand ist also der 0-Punkt) und hinter dem am weitesten außen liegenden Spannungsring endet.

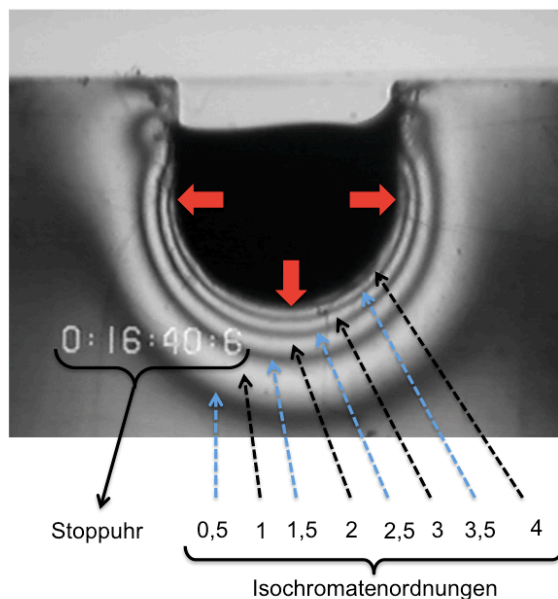
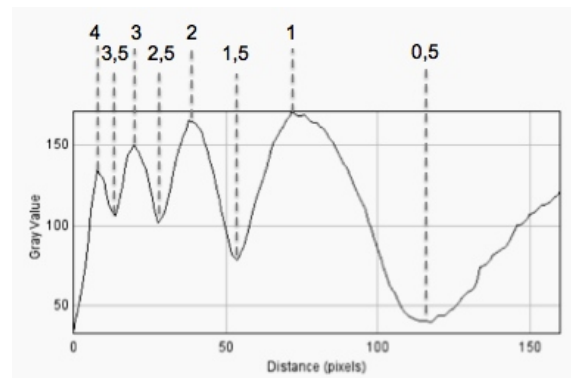


Abb. 3.2.4-1: Exemplarische Blockfüllung mit x-tra base, gezeigt ist die Füllung nach 1000 s. Die gestrichelten Pfeile zeigen die zugehörigen Isochromatenordnungen zu den Spannungsringen. Die roten Blockpfeile zeigen die 3 Stellen, an denen ausgemessen wurde.

Ein solches Helligkeitsprofil zu dem in Abb. 3.2.4-1 gezeigten Bild ist in Abb. 3.2.4-2 zu sehen: Es sind die Helligkeitsmaxima und –minima erkennbar, diese geben die Anzahl und die Position der hellen und dunklen Spannungsringe, also der Isochromatenordnungen, an. An diesem Graphen konnte die genaue Entfernung jedes Ringes vom Kavitätenrand in Pixeln abgelesen werden. Die Entfernung dieser Extrema in Pixeln wurde in Excel (Microsoft Office 2003) gegen die jeweilige Ordnung in ein Diagramm eingetragen (Abb. 3.2.4-3).

Durch lineare Regression wurde eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte gelegt. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Abszisse gibt die Isochromatenordnung, die am rechten Kavitätenrand vorlag, an. Diese beträgt im Beispiel ca. 4,3 Isochromatenordnungen. Da eine lineare Regressionsgerade gewünscht war und die Ordnungen 0,5 und 1 jeweils deutlich von der linearen Tendenz der anderen Werte abwichen, wurden nur die Werte ab 1,5-facher Isochromatenordnung in die Auswertung und Regression mit einbezogen (Abb. 3.2.4-3). Dies setzte voraus, dass die Gesamtspannung größer als 1 Isochromatenordnung war.



3.2.4-2: Ausschnitt aus dem zur Auswertung benutzten Programm Image J für das oben gezeigte Beispielbild (Abb. 3.2.4-1). Gezeigt ist der Helligkeitsverlauf auf dem Foto der gefüllten Kavität in Abhängigkeit von dem Abstand vom Kavitätenrand (nur an der rechten Seite, d.h. an dem rechten roten Pfeil). Der Kavitätenrand liegt bei 0 Pixeln. Die lokalen Extrema dieser Kurve geben die Lage der jeweiligen Ordnungen an (gestrichelte graue Linien zeigen die jeweilige Ordnung).

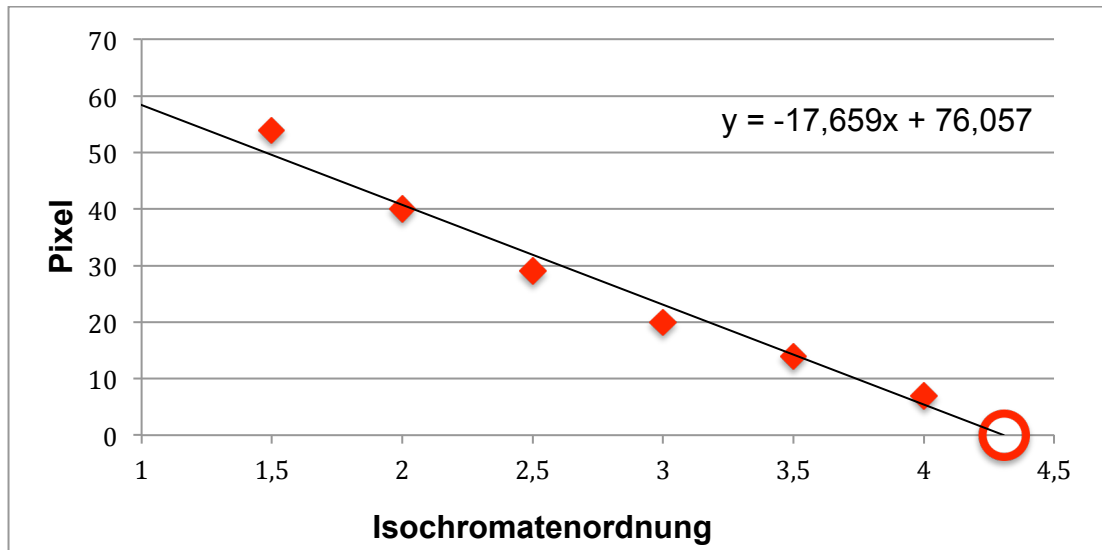
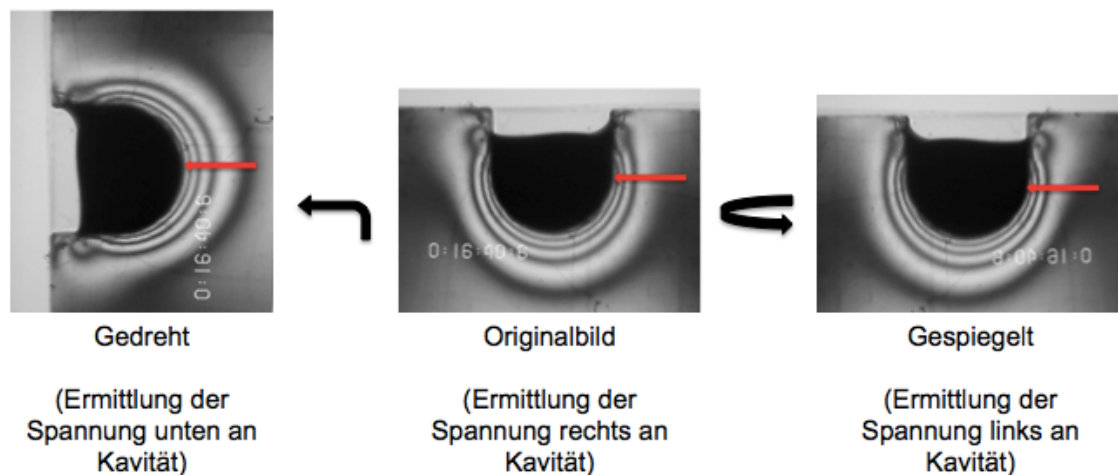


Abb. 3.2.4-3: grafische Darstellung des Abstandes der jeweiligen Ordnungen (aus Abb. 3.2.4-1 bzw. 3.2.4-2) vom Kavitätenrand. Durch lineare Regression und Extrapolation kann die Spannungsordnung, die am Übergang von Kavität zur Füllung vorliegt (Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Abszisse), ermittelt werden.

Da das Helligkeitsprofil mit dem Bildverarbeitungsprogramm Image J nur waagerecht im Bild von links nach rechts erstellt werden konnte, die Spannung aber in 3 Bereichen des Bildes gemessen werden sollte, wurde jedes Originalbild zusätzlich in um 90° nach links gedrehter Form gespeichert (um die Spannung am Kavitätenboden zu ermitteln), und in um eine vertikale Achse gespiegelter Form (um die Spannung links der Kavität zu ermitteln). Dieses wurde mit dem Programm ACDSee (Fa. ACD, Seattle, Washington USA) durchgeführt.



3.2.4-4: Am Originalbild kann nur die Spannung rechts in der Kavität ermittelt werden. Um die Spannung unten in der Kavität zu ermitteln, muss das Bild gedreht werden. Um die Spannung links in der Kavität zu ermitteln, muss das Bild an einer vertikalen Achse gespiegelt werden. Die Stelle, an der ausgemessen wurde, ist jeweils mit einem roten Pfeil markiert.

Aus der Spannung in Ordnungen, welche an den jeweils drei Bereichen der Kavitäten ermittelt wurden, wurde das arithmetische Mittel gebildet. So erhielt man für jede Probe einen Spannungsmittelwert. Durch Multiplikation dieses Wertes (in Isochromatenordnungen) mit 2,34 MPa erhielt man den äquivalenten Wert in MPa (gemäß Diss. Klingler und Nötzel).

4. Entwicklung einer neuen Applikationstechnik für fließfähige Komposite

4.1 Kompositapplikation laut Herstellerangabe

In der ersten Versuchsreihe wurden die beiden zu untersuchenden Materialien laut Herstellerangaben verarbeitet und gehärtet. So wurden die Versuchskavitäten ($n = 12$) in einem Zuge 4 mm hoch aufgefüllt und anschließend jeweils 20 s von oben sowie von den beiden Seitenflächen belichtet.

4.2 Kompositapplikation mit der Schichttechnik

Die Schichttechnik ist eine konventionelle Methode, um die entstehenden Spannungen in den Kavitäten zu reduzieren und einem Abreißen der Kompositfüllungen vorzubeugen. Dazu wird das Material in kleinen Portionen (< 2 mm) eingebracht und jede Schicht einzeln gehärtet. Im Rahmen der Untersuchungen wurden also die beiden Komposite in 3 gleichhohen Portionen eingefüllt (jeweils ca. 1,7 mm) und jede Schicht 20 s von oben belichtet, nach der letzten Schicht wurde außerdem von den beiden Seitenflächen noch jeweils 20 s gehärtet.

4.3 Vorversuche zur Vorbelichtung

In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich möglich ist, Komposit schon beim Einfüllen zu belichten. Hier wurde der zeitliche Verlauf der Aushärtung dreier verschiedener Komposite mit einer akustischen Messmethode (nach ALTHAUS und GENTE) bestimmt. Diese Messvorrichtung besteht aus 2 Lautsprechern, welche über einen Metallstab und eine Kompositprobe auf einer Glasplatte verbunden sind. Die Membran des ersten Lautsprechers wird durch einen Frequenzgenerator, welcher eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt, in Schwingung gebracht. Der zweite Lautsprecher

ist mit einem Mikrofon gekoppelt, dessen Spannung mit einem Millivoltmeter gemessen und mit einem xt-Schreiber aufgezeichnet wird. Wenn nun unter Belichtung die Kompositprobe in ihrer Konsistenz zunehmend härter wird, wird die Schwingung des ersten Lautsprechers über den Metallstab und die Kompositprobe auf der Glasplatte zunehmend auf den zweiten Lautsprecher übertragen, dann stellt sich mit Erreichen der Endhärte eine konstante Spannung ein.

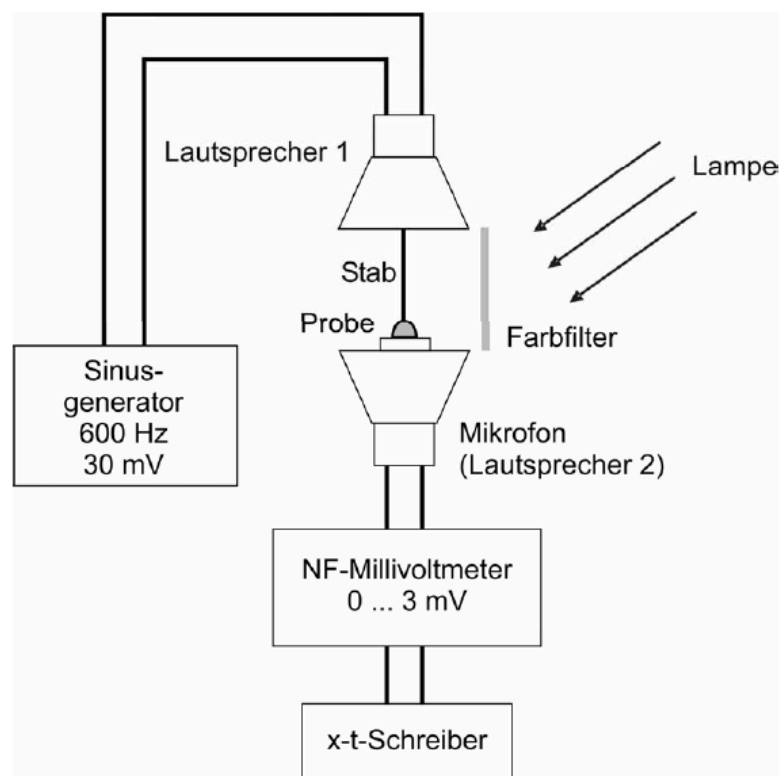


Abb. 4.3-1: Schematischer Aufbau des akustischen Messsystems zur Verarbeitungszeit von Komposit (aus Dissertation Althaus).

Interessant für unsere Fragestellung ist es, wie viel Zeit von dem Start der Belichtung bis zu einem gerade nicht mehr plastisch verformbaren Zustand des Komposits vergeht. Dazu wurde der Übergang von plastisch-verformbar zu gelartig auf „5 % von A“ festgelegt, gemäß dem Richtwert für die Verarbeitungszeit nach Althaus. Die Auswertung erfolgte gemäß den nach Althaus und Gente festgelegten Regeln.

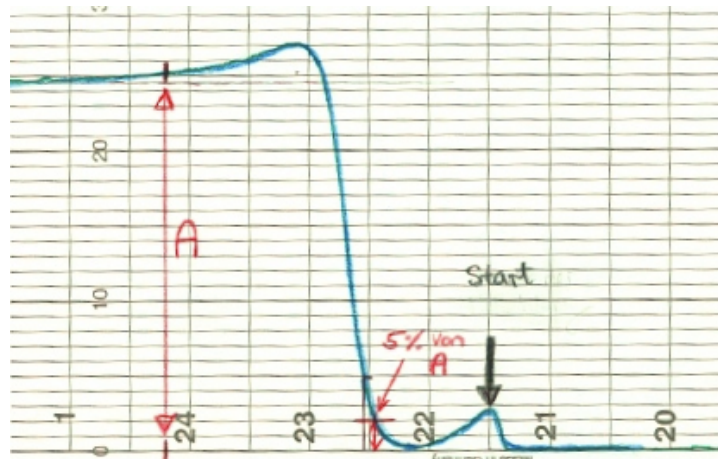


Abb. 4.3-2: Schematische Aufzeichnung des Aushärtungsverlaufs mit dem akustischen Messsystem, Berechnung des Wertes „5 % von A“, wobei A die Mikrofonspannung (mV) für den auspolymerisierten Zustand angibt. Es ist erkennbar, dass die Polymerisation nicht schleichend, sondern schlagartig einsetzt.

Die Messungen erfolgten mit einem fließfähigen Komposit (SDR®, Dentsply DeTrey), welches eines der beiden Fabrikate aus den Hauptversuchen ist. Als Lichtquelle diente eine blaue Leuchtdiode, da auch in die endgültige Vorrichtung für die Kompositapplikation eine kleine Leuchtdiode als Lichtquelle integriert werden sollte. Zunächst wurde gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen steigender Stromstärke und resultierender Lichtleistung der verwendeten Leuchtdiode annähernd linear ist. Die Leuchtdiode wurde in einem Abstand von 6 mm zur Probe angebracht. Dann wurde die Lichtleistung für den jeweiligen Strom, der durch die Leuchtdiode fließt, bestimmt (Broadband Power/Energy Meter (13 PEM001), Melles Griot, Rochester, NY, USA), siehe Abb. 4.3-3.

Außerdem wurde die Gelierzeit (Zeit vom Startpunkt der Belichtung bis zu 5 % von A, siehe Abb. 4.3-2) gegen verschiedene Ströme, die durch die Leuchtdiode flossen, aufgetragen (Abb. 4.3-4).

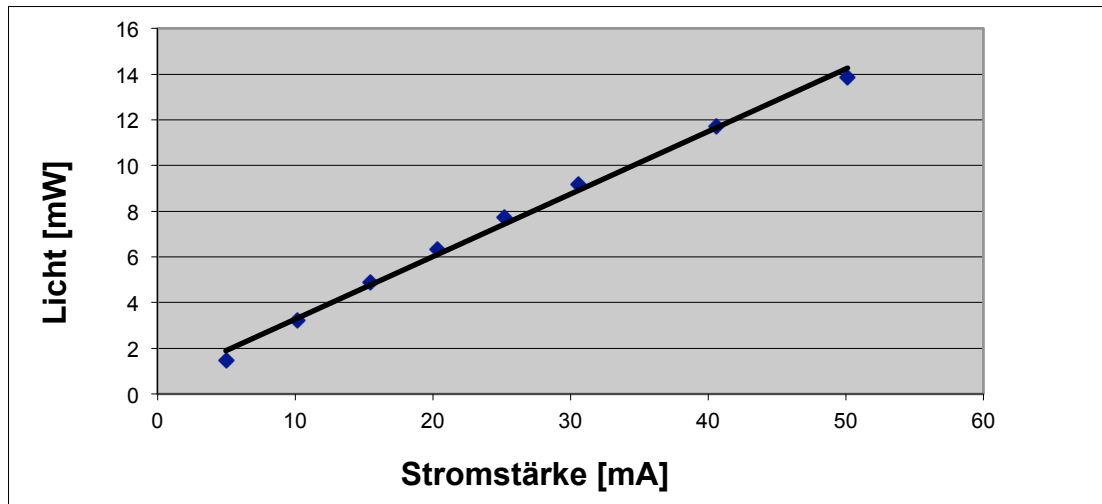


Abb. 4.3-3: Der Zusammenhang zwischen der verwendeten Stromstärke und der Lichtleistung der Leuchtdiode ist linear.

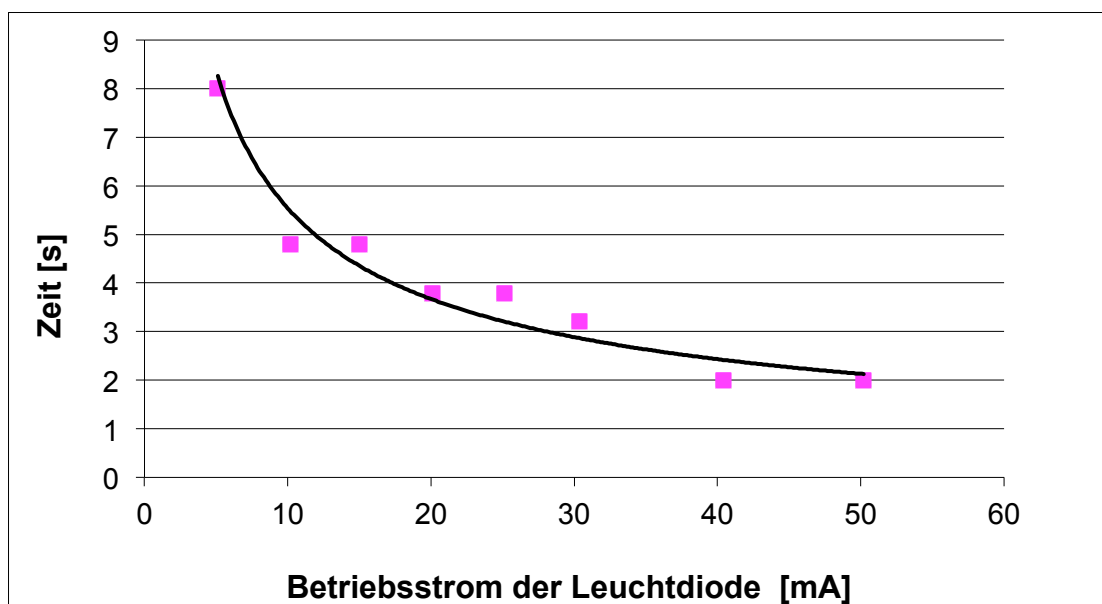


Abb. 4.3-4: Die Gelierzeiten wurden mit dem akustischen Messsystem als „5 % von A“ gemessen. Sie wurden gegen den Betriebsstrom der LED aufgetragen. Es scheinen bei einem Abstand von 6 mm der LED zum Komposit immer mindestens 2 Sekunden zu vergehen, bis der Gelierprozess eintritt. Dies zeigt, dass das Material genug Zeit hat, an die Kavitätenwand anzufließen, auch wenn es gleichzeitig schon belichtet wird.

In Abb. 4.3-2 ist erkennbar, dass die Polymerisation nicht schleichend, sondern schlagartig einsetzt. Da außerdem einige Zeit vom Startzeitpunkt der Belichtung bis zum Start der Polymerisation vergeht, ist die Vorstellung, Komposit schon beim Einfüllen zu belichten und damit nicht die Adaptation an die Kavitätenwand zu gefährden, realistisch. So hat das Material, obwohl es beim Austritt aus der Compule schon belichtet wird, noch eine gewisse Zeit an die Kavitätenwand anzufließen, bevor der Gelierprozess eintritt. Das könnte man damit erklären, dass die im Komposit enthaltenen Stabilisatoren also erst vollständig verbraucht sein müssen, bevor die Polymerisation einsetzt.

4.4 Kompositapplikation unter Vorbelichtung

Das Komposit kann nach unserer Beobachtung auch unter Belichtung beim Einfüllen noch gut an die Kavitätenwand adaptieren und dann gelieren, zumal es in der Kavität beim weiteren Einfüllen des Komposits weiterhin belichtet wird. Durch nachfließendes Material während der Applikation soll der sogenannte „Gelschrumpf“ kompensiert werden.

4.4.1 Konstante Vorbelichtung

Es sollte geprüft werden, ob die oben geschilderte Annahme realistisch ist. Dafür wurden zunächst Füllungen unter einer gleich bleibenden Belichtung gelegt. Diese Vorgehensweise war natürlich noch nicht „praxistauglich“ oder einfach durchzuführen, es sollte lediglich die Hypothese geprüft werden, ob die Vorbelichtung während des Einfüllens des Komposits eine signifikante Reduktion der Spannungen bewirken kann.

4.4.1.1 mittels Halogen-Polymerisationslampe

Zunächst wurde die Annahme überprüft: lassen sich die Spannungen in der Versuchskavität tatsächlich reduzieren, indem man das Komposit schon beim Einfüllen belichtet? Dazu wurde eine einfache Versuchsvorrichtung benutzt: eine Halogen-Polymerisationslampe wurde an einem Stativ mit einer Stativklemme befestigt, sodass das Lichtaustrittsfenster genau senkrecht über der Versuchskavität lag. Nun wurden Blockfüllungen mit den beiden Versuchsmaterialien durchgeführt und die resultierenden Spannungen gemessen, während der Abstand zwischen 3 cm und 8 cm variiert wurde, um einen optimalen Abstand für diese Versuchsanordnung herauszufinden. Dabei wurde angestrebt, möglichst nahe mit dem Lichtaustrittsfenster an die Kavität heranzugehen, ohne dabei das Komposit frühzeitig auszuhärten, denn dann fließt es nicht blasenfrei und korrekt an die Kavitätenwand an. Bei einem Abstand von 8 cm zeigte sich keinerlei Effekt in Form einer Spannungsreduktion, ein Abstand von 4 cm zeigte eine deutliche Spannungsreduktion. Wenn man mit dem Lichtaustrittsfenster noch näher an die Kavität heran ging, war ein Anfließen des Komposits an die Kavitätenwand nicht mehr gewährleistet. Als ein optimaler Abstand von 4 cm gefunden war, wurden jeweils 10 Versuchskavitäten mit SDR® und x-tra base unter Belichtung aus diesem Abstand gefüllt. Das Einfüllen geschah hierbei langsam, in ca. 45 ± 5 s. Diese Zeit wurde durch die eingblendete Stoppuhr auf dem Bildschirm realisiert. Jede Füllung wurde wiederum 20 s von jeder Seite nachgehärtet, insgesamt 60 s.

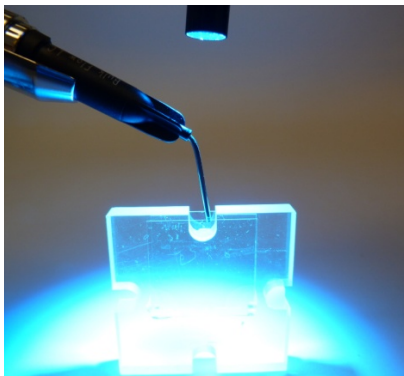
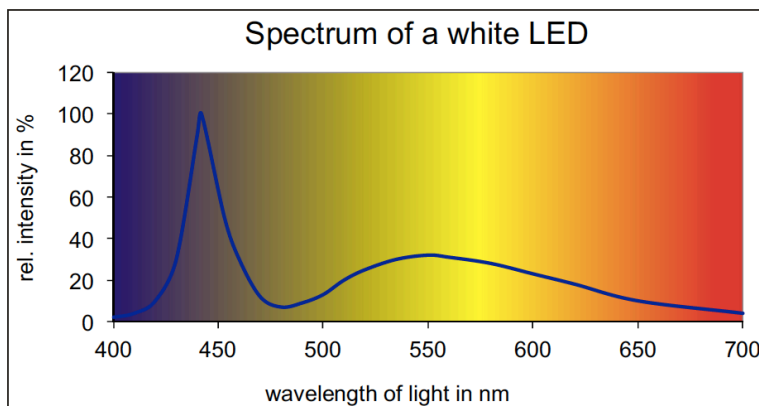


Abb. 4.4.1.1-1: Zeigt das Einfüllen des Materials x-tra base und das gleichzeitige Belichten mit einer Halogen-Polymerisationslampe aus 4 cm Entfernung.

4.4.1.2 mittels „weiß“-strahlender LED

Um die Idee des gleichzeitigen Einfüllens und Belichtens praktisch umsetzen zu können, wurde die Halogenlampe durch eine LED ersetzt. Hier gibt es prinzipiell die Möglichkeit, eine blaue oder eine weiße LED zum Vorhärten zu benutzen, da auch eine weiße LED genug Blauanteil in ihrem Spektrum enthält. Da die weiße LED deutlich angenehmer für die Augen des Anwenders ist, wurde eine weiße LED (Typ: NSPW 500DS 5mm, Conrad Electronic, Hirschau) für die neue Applikationsvorrichtung gewählt.



*Abb. 4.4.1.2-1:
Wellenlängen-Spektrum
einer weißen LED
(Beispiel). Es ist
erkennbar, dass eine
weiße LED einen hohen
Blauanteil aufweist.*

Die LED wurde direkt an der Applikationspistole befestigt, und zwar über ein Röhrchen, welches man zum Wechseln der Compulen abnehmen und danach wieder exakt zurücksetzen konnte. So war ein immer gleicher Abstand der LED gegenüber der Compulenaustrittsöffnung möglich, dieser wurde auf 6 mm festgelegt. Bei diesem Abstand ist keine Beeinträchtigung des Kompositflusses erkennbar und man kommt auch mit dem Compulenröhrchen tief genug in die Kavität, bis an den Kavitätenboden, ohne dass die LED an die Plättchenoberfläche stößt. Die Achse der LED wurde so gewählt, dass im Zentrum des Lichtkegels der Schatten des Austrittsröhrchens erkennbar war. Der Anoden- und Kathodendraht wurde jeweils mit einem Draht verlötet. Es wurde zunächst ein einfacher Stromkreis hergestellt, bestehend aus einer regelbaren Spannungsquelle, einem Widerstand (100 Ω), der LED und einem Strommessgerät.

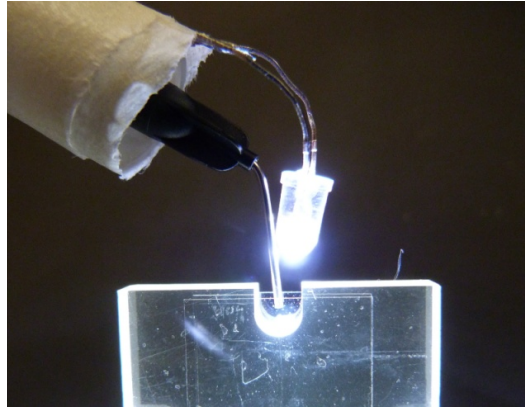


Abb. 4.4.1.2-2: Die Achse der Leuchtdiode zeigt genau auf die Austrittsöffnung des Ausspritzrohres, behindert dabei aber nicht die Beweglichkeit des Röhrchens in der Kavität, sodass das Röhrchen in jeden Winkel bewegt und die Kavität blasenfrei aufgefüllt werden kann. Hier gezeigt mit einer x-tra base Compule (VOCO, Cuxhaven). Die Leuchtdiode ist an einem Aufsteckröhrchen fixiert.

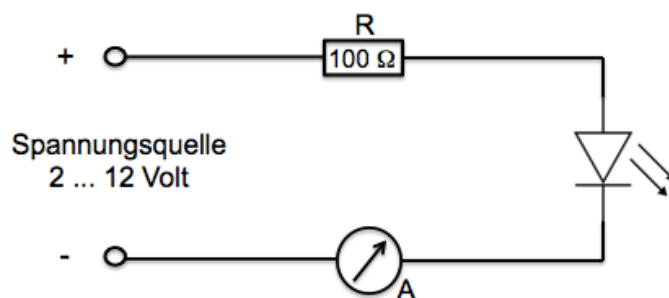


Abb. 4.4.2-3:
Zunächst besteht der Versuchsaufbau aus einem einfachen Stromkreis.

Für die Leuchtdiode mit 6 mm Abstand zur Austrittsöffnung sollte zunächst für eine vorgegebene Einfüllzeit eine geeignete Stromstärke zur Applikation der beiden Komposite gefunden werden.

Dieser Strom wurde nun experimentell ermittelt, indem die Kavitäten unter LED-Belichtung gefüllt wurden, wobei der Strom zwischen 20 und 70 mA variiert wurde. Die Einfüllzeit betrug für jede Füllung $30 \text{ s} \pm 3 \text{ s}$. Diese Einfüllzeit wurde mit Hilfe der Stoppuhr, die auf dem Bildschirm eingeblendet war, kontrolliert. Die jeweils resultierenden Spannungen wurden gemessen.

4.4.2 Automatisch regulierte Vorbelichtung

Bisher wurde für eine konstante Einfüllzeit von 30 s die optimale Stromstärke bzw. Lichtintensität gefunden. Das eingefüllte Kompositvolumen pro Füllung blieb dabei ebenfalls immer konstant, somit war auch die Einfüllgeschwindigkeit pro Füllung im Schnitt immer konstant. Naheliegender ist, dass es eine optimale Lichtdosis für die Vorbelichtung der Füllung gibt. Wir vermuten, dass die optimale Lichtmenge zur Vorbelichtung immer dann eingehalten wird, wenn die Einfüllgeschwindigkeit gleich der Lichtintensität multipliziert mit einer Konstanten ist. Denn schnelles Einfüllen erfordert höhere, langsames Einfüllen erfordert geringere Lichtintensitäten.

$$\textbf{Einfuellgeschwindigkeit} = \textbf{optimale Konstante} * \textbf{Lichtintensitaet}$$

Daraus folgt, dass sich die Lichtintensität verändern muss, wenn man die Applikationsgeschwindigkeit verändert. Um das zu erreichen, muss die Applikationsgeschwindigkeit elektronisch erfasst werden. Dies wurde durch ein Schiebepotentiometer erreicht, welches derart an den Griff der Applikationspistole angebracht wurde, dass der Schieber des Potentiometers durch Betätigung des Handgriffs der Pistole bewegt wird. Dies geschieht unter der Annahme, dass sich das Verhältnis zwischen Bewegung des Handgriffs (und damit des Potentiometerschiebers) und dem Weg des Applikationsstempels (und damit der applizierten Menge Komposit) linear verhält. Dieser lineare Zusammenhang wurde in einem einfachen Versuchsaufbau nachgewiesen. Dazu wurde der Widerstand des Potentiometers in kΩ mit einem Multimeter erfasst für verschiedene Positionen des Stempels, welche jeweils in mm mit einer Messuhr bestimmt wurden (Abb. 4.4.2-4).

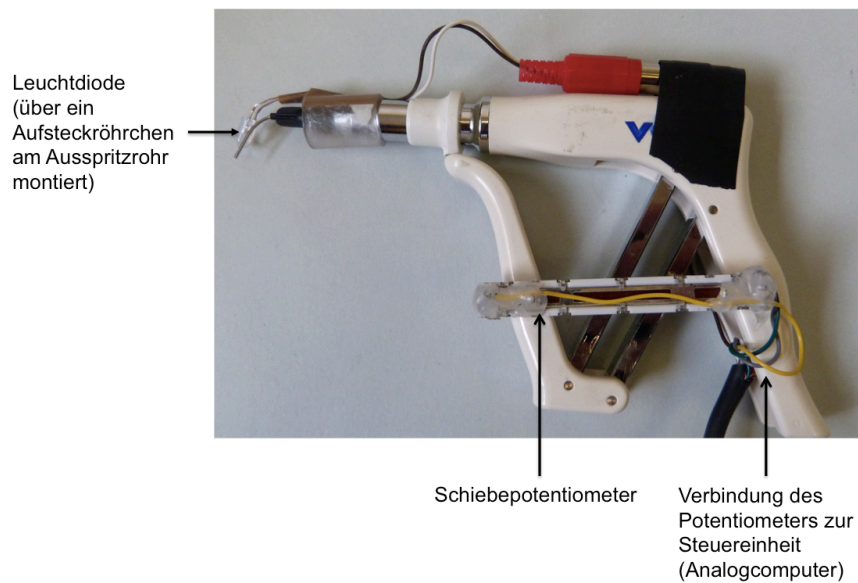


Abb. 4.4.2-1: Seitliche Aufsicht auf die erweiterte Applikationspistole. Das Schiebepotentiometer ist am Handgriff der Applikationspistole angebracht. Der vordere Griff (welchen man drückt) ist mit dem Schieber des Potentiometers verbunden.

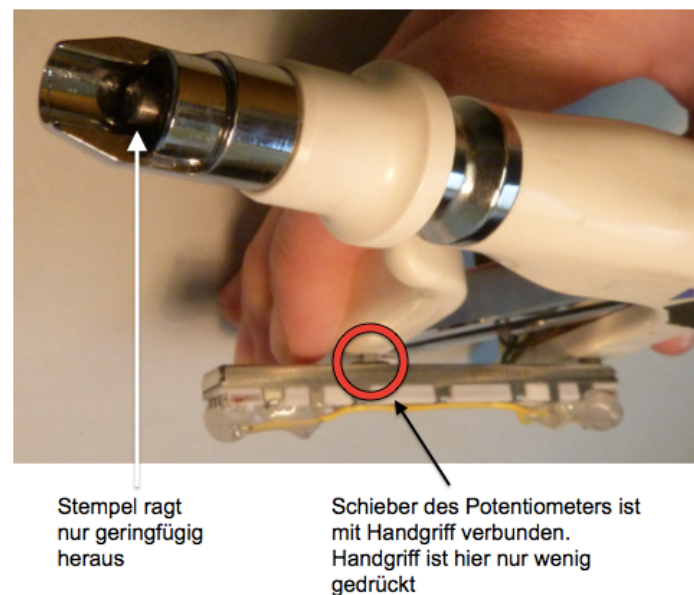


Abb. 4.4.2-2: Ansicht der Applikationspistole von vorne-oben. Die Verbindung des Potentiometer-Schiebers zum Handgriff der Pistole ist sichtbar (Pfeil).

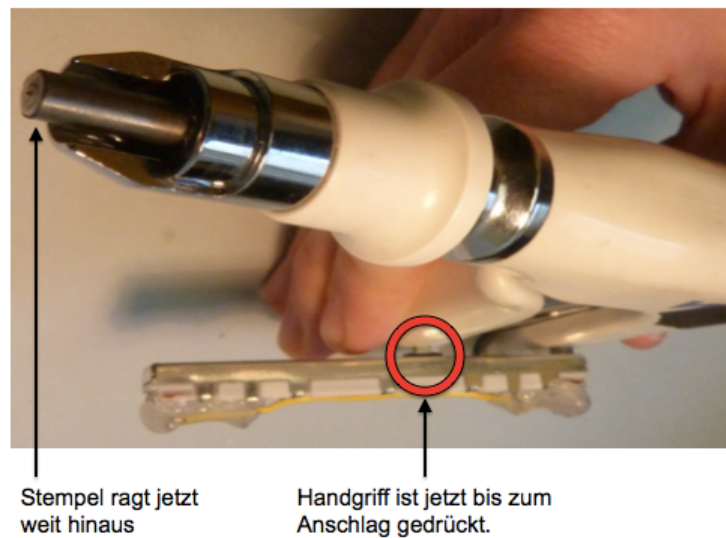


Abb. 4.4.2-3: Der Griff der Applikationspistole ist jetzt bis zum Anschlag durchgedrückt, sodass der Stempel auch maximal weit herauschaut. Man sieht, dass sich der Schieber des Potentiometers mitbewegt hat (Pfeil).

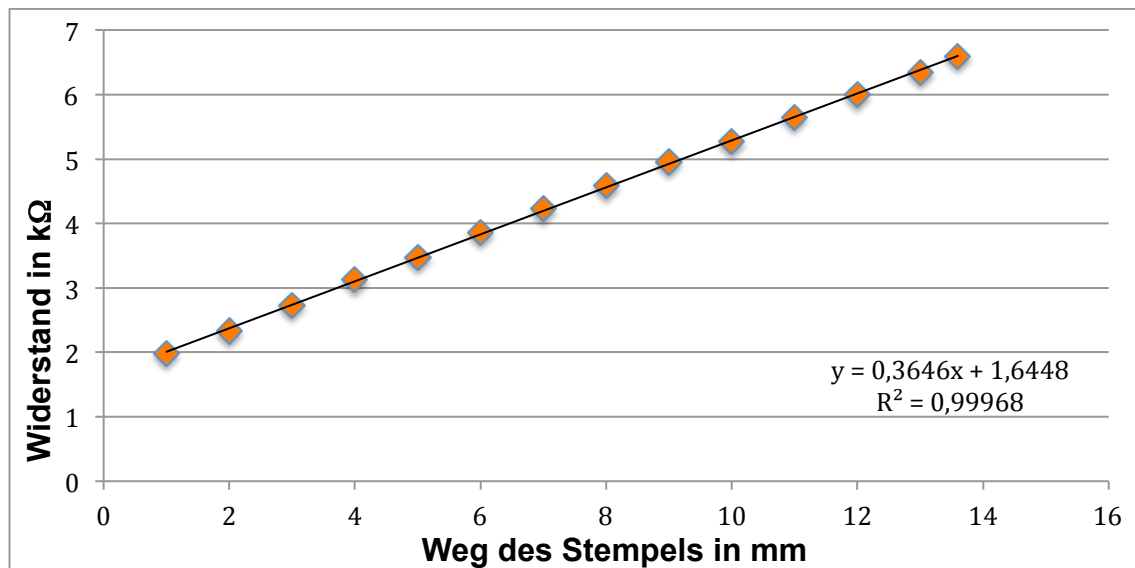


Abb. 4.4.2-4: Widerstand des Potentiometers ($k\Omega$) in Abhängigkeit von der Stempelposition. Dargestellt sind die 14 einzelnen Messwerte und die Regressionsgerade. Es wird ein linearer Zusammenhang im getesteten und für uns relevanten Intervall deutlich.

Das Potentiometer kann so geschaltet werden, dass es an seinem Schleifer eine Spannung abgibt, welche proportional zur Lage des Applikationsstempels (Weg in mm) ist. Diese Spannung wird in einer Steuereinheit, ein selbstgebauter Analogcomputer, über die Zeit differenziert. Dann ist die Spannung der Bewegungsgeschwindigkeit des Stempels (Weg pro Zeit in mm/s) und damit der Applikationsgeschwindigkeit, proportional. Ein Spannungs-Strom-Wandler versorgt dann die Leuchtdiode mit einem zu dieser Spannung proportionalen Strom. Am Differentiator ist außerdem mit einem Drehschalter der Proportionalitätsfaktor k verstellbar, sodass für verschieden lichtempfindliche Komposite die Lichtintensität reguliert werden kann. Für die Applikation von SDR® wurde die „Stufe 3“ gewählt (das entspricht bei einer Einfüllzeit von 30 s einem Strom von ca. 60 mA). Für die Applikation von x-tra base wurde die „Stufe 4“ gewählt, da dieses Material offensichtlich initial mehr Licht verträgt. Die maximal mögliche „Stufe“ und damit Stromstärke wurde für beide Materialien durch einfaches Ausprobieren ermittelt (wurde die Stufe zu hoch gewählt, bildeten sich bereits beim Einfüllen des Komposits „Klumpen“). Die mit dieser Versuchsanordnung erzielbare Spannungsreduktion wurde gemessen. Die Einfüllzeiten des Komposits in die Kavität wurden variiert und die entstehenden Spannungen verglichen. Die Einfüllzeit wurde wie in den übrigen Versuchen mittels der in das Video eingeblendeten Stoppuhr gemessen.

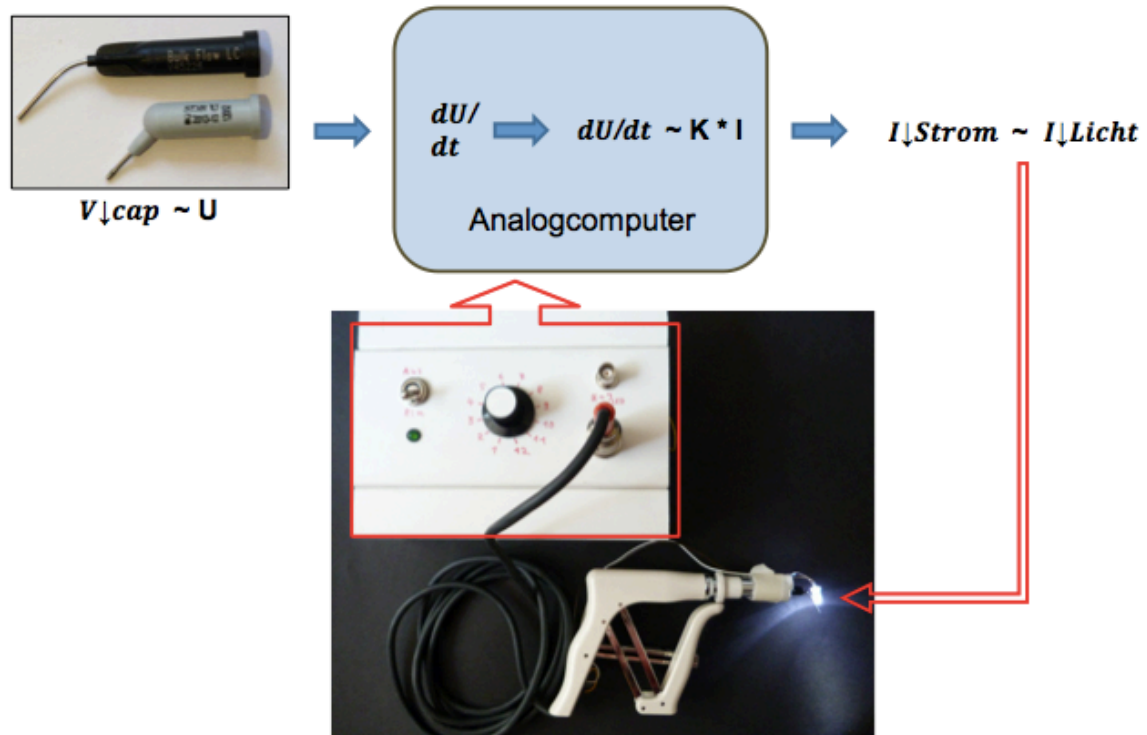


Abb. 4.4.2-5: Schema der endgültigen Applikationsapparatur. Die Stempelbewegung und damit das sich ändernde Volumen in den Compulen wird durch das Potentiometer in eine dazu proportionale Spannung umgesetzt. Diese Information wird in einen Analogcomputer eingespeist. Dort wird die Spannung über die Zeit differenziert und in einen dazu proportionalen Strom umgewandelt. Dieser erzeugt in der Leuchtdiode eine dazu proportionale Lichtintensität.

5. Ergebnisse

5.1 Spannungen nach Applikation laut Herstellerangaben

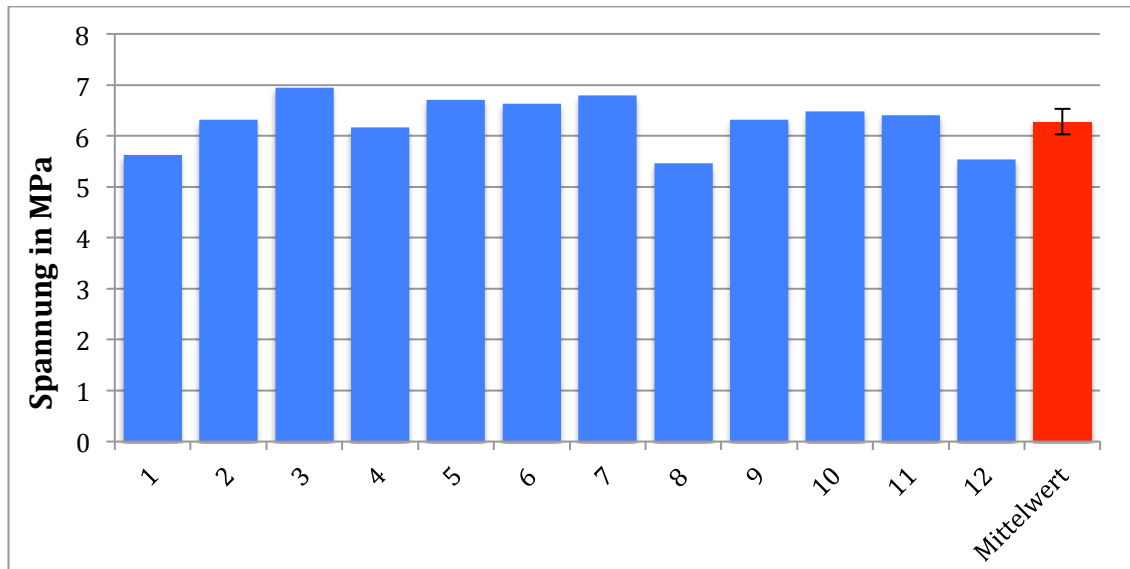


Abb. 5.1-1: Spannungen bei Anwendung von SDR® laut Herstellerangaben (Blockfüllung) (in MPa nach 1000 s). Angegeben sind die 12 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

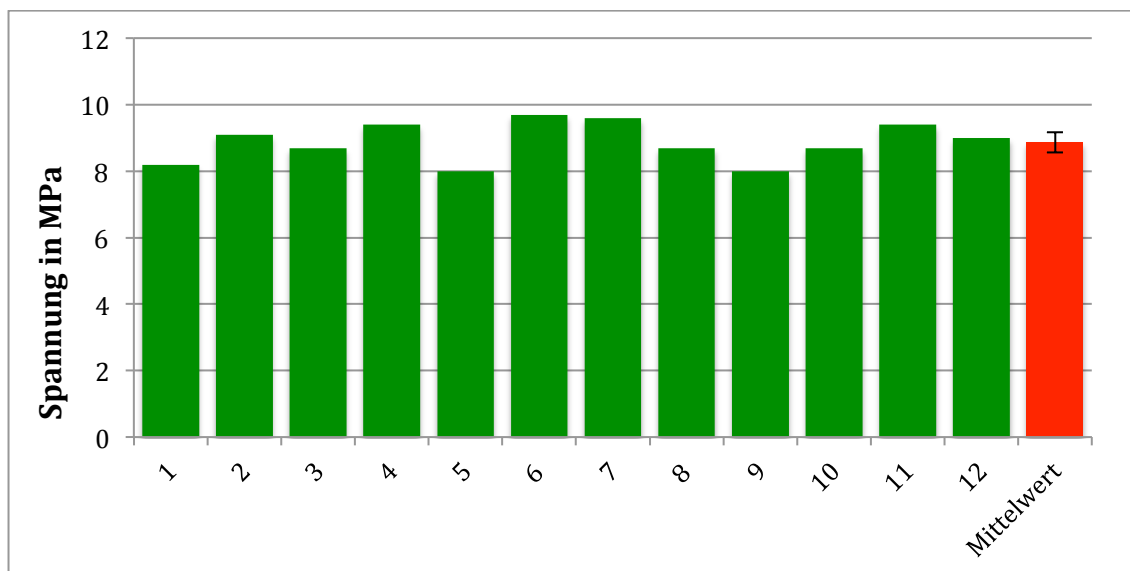


Abb. 5.1-2: Spannungen bei Anwendung von x-tra base laut Herstellerangaben (Blockfüllung) (in MPa nach 1000 s). Angegeben sind die 12 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

5.2 Spannungen nach Anwendung der Schichttechnik

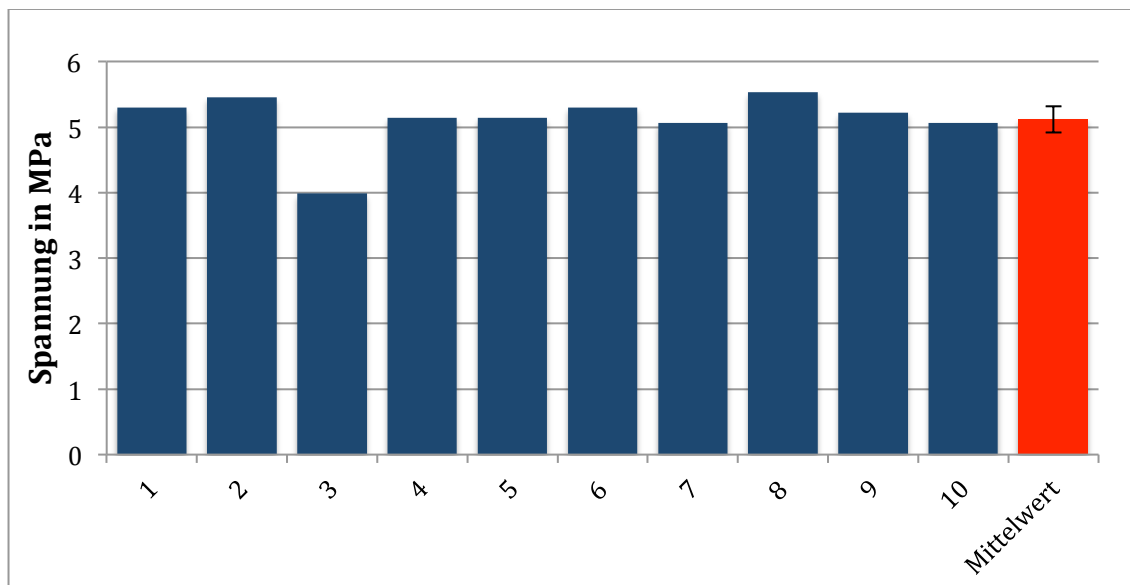


Abb. 5.2-1: Spannungen bei Anwendung von SDR® mit der Schichttechnik (in MPa nach 1000 s). Angegeben sind die 10 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

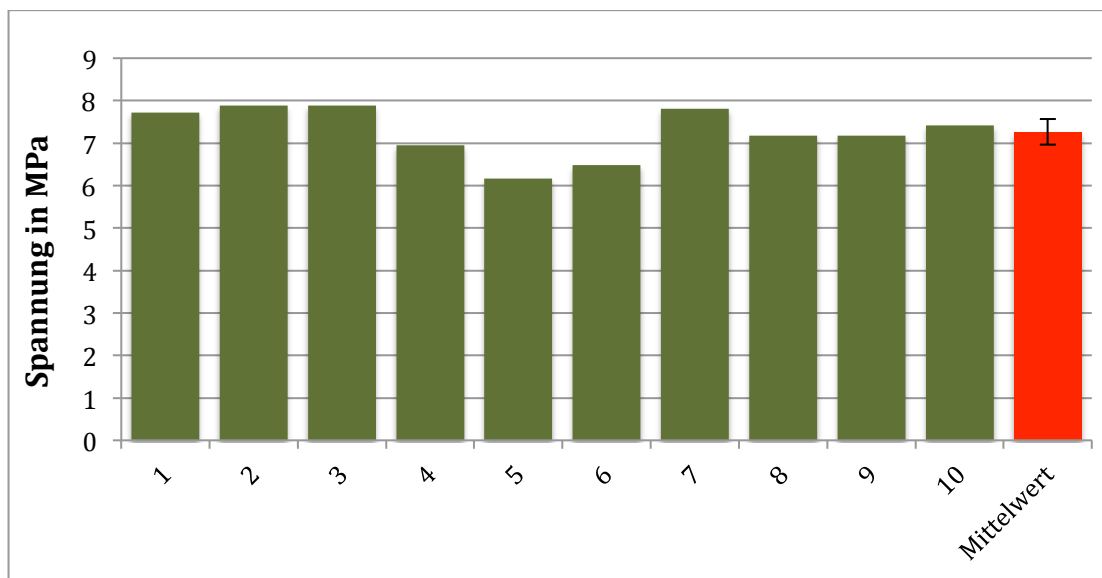


Abb. 5.2-2: Spannungen bei Anwendung von x-tra base mit der Schichttechnik (in MPa nach 1000 s). Angegeben sind die 10 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

5.3 Spannungen nach konstanter Vorbelichtung

Nach der Vorbelichtung und vor der Endhärtung waren keine Spannungen nachweisbar. Diese traten bei jedem Experiment erst bei der Endhärtung auf. Dies gilt für alle Versuche mit Vorbelichtung (5.3 – 5.5).

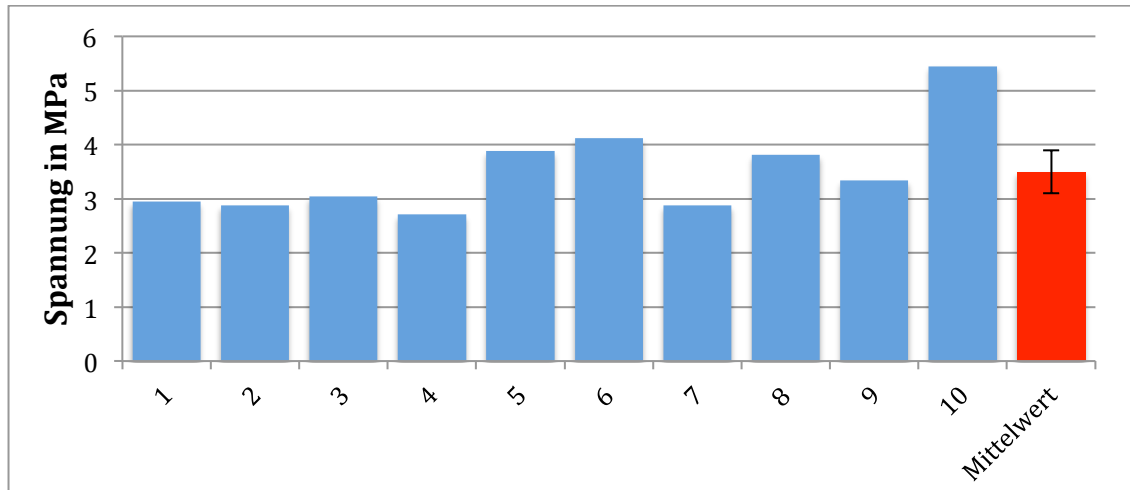


Abb. 5.3-1: Spannungen nach Anwendung von SDR® (in MPa nach 1000 s). Applikation unter gleichzeitiger Beleuchtung mit einer Halogen-Polymerisationslampe (4 cm Abstand). Gezeigt sind die 10 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

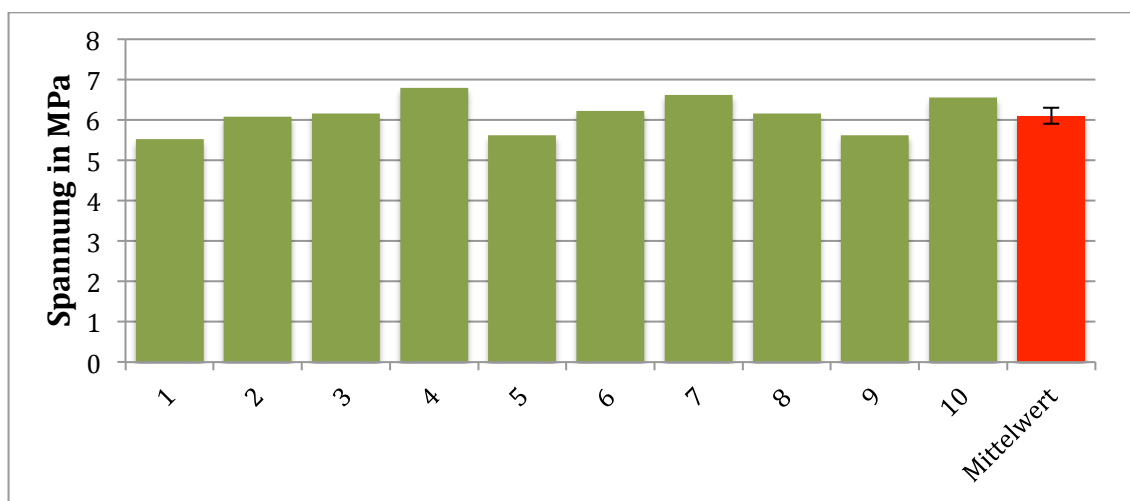


Abb. 5.3-2: Spannungen nach Anwendung von x-tra base (in MPa nach 1000 s). Applikation unter gleichzeitiger Beleuchtung mit einer Halogen-Polymerisationslampe (4 cm Abstand). Gezeigt sind die 10 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

5.4 Spannungen nach Variation der Vorbelichtung

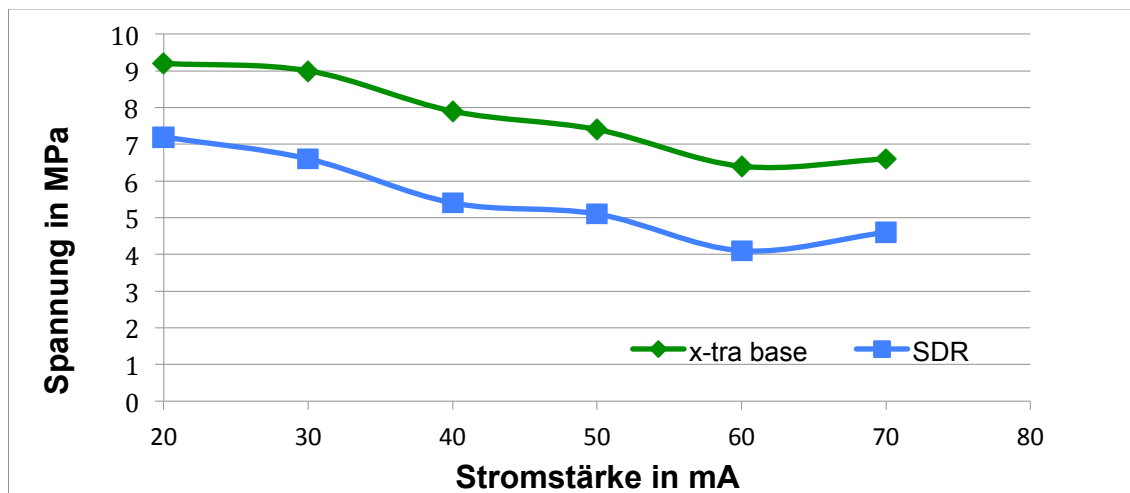


Abb. 5.4-1: Es wurden unter Belichtung mit der weißen LED Füllungen unter verschiedenen Stromstärken gelegt und die resultierenden Spannungen gemessen. Dabei wurde die Einfüllzeit immer konstant gehalten ($30 \text{ s} \pm 3 \text{ s}$). Die Grafik zeigt eine Abnahme der Spannungswerte für steigende Ströme. Für Ströme über 60 mA konnte mit diesem Versuchsaufbau keine weitere Abnahme der Spannungswerte nachgewiesen werden. Es sind jeweils die Mittelwerte aus drei Messwerten je Stromstärkeeinstellung als Punkte dargestellt sowie eine Linie durch diese Mittelwerte.

5.5 Spannungen nach automatischer Vorbelichtung

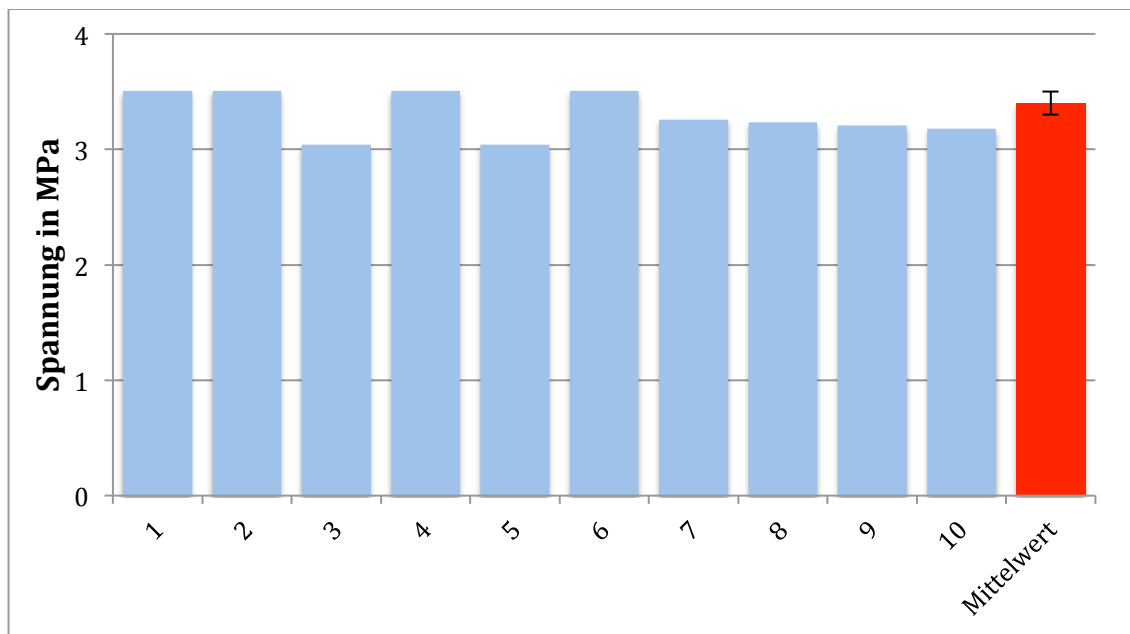


Abb. 5.5-1: Spannungen nach Anwendung von SDR® (in MPa nach 1000 s). Applikation mit der automatischen Vorbelichtung (LED). Gezeigt sind die 10 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

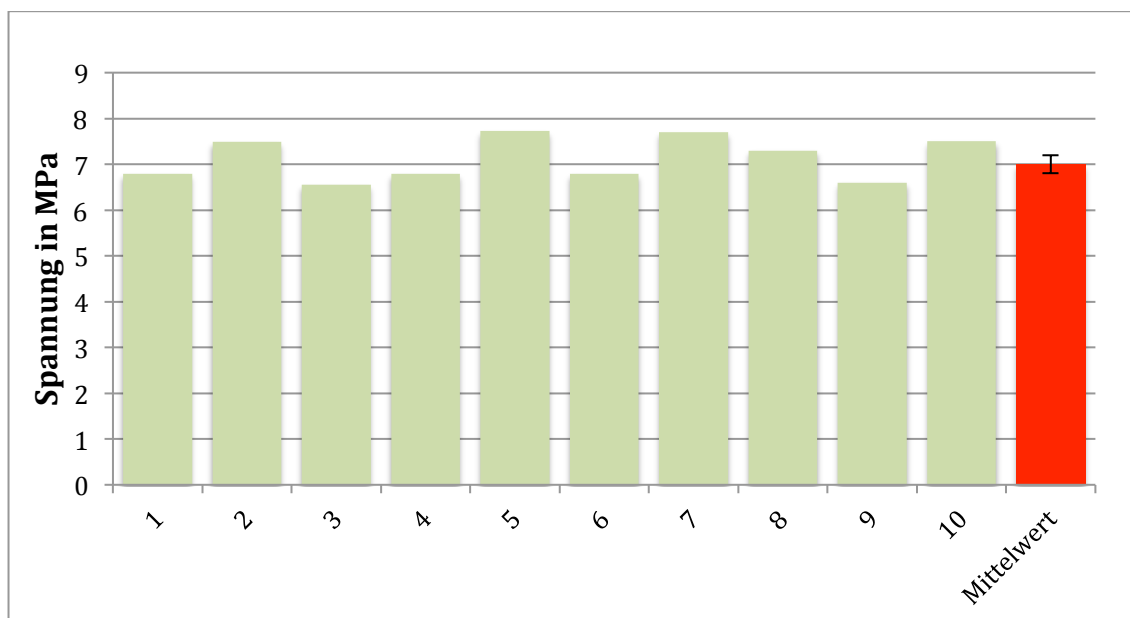


Abb. 5.5-2: Spannungen nach Anwendung von x-tra base (in MPa nach 1000 s). Applikation mit der automatischen Vorbelichtung (LED). Gezeigt sind die 10 einzelnen Messwerte und der Mittelwert (rot) mit Standardabweichung.

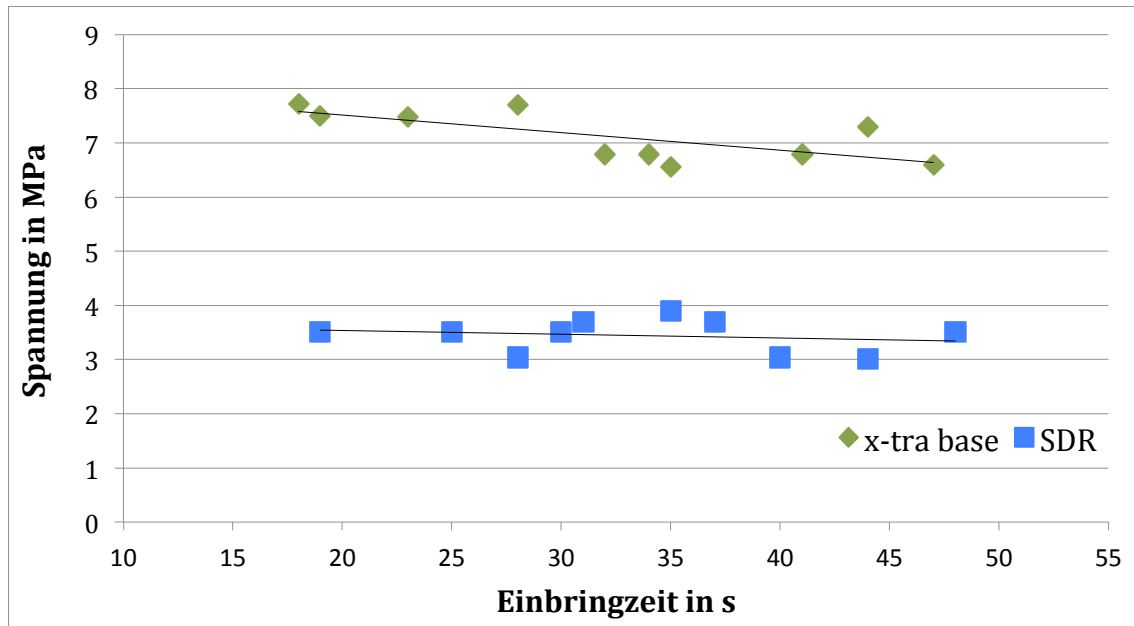


Abb. 5.5-3: Test der automatischen Lichtregulierung. Die Compositeinfüllzeiten betrugen zwischen 18 und 48 s. Eine Abhängigkeit der Spannungsentwicklung von der Einfüllzeit konnte nicht nachgewiesen werden, es deutet sich jedoch eine leicht abnehmende Spannung mit zunehmender Einfüllzeit an.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und statistische Auswertung

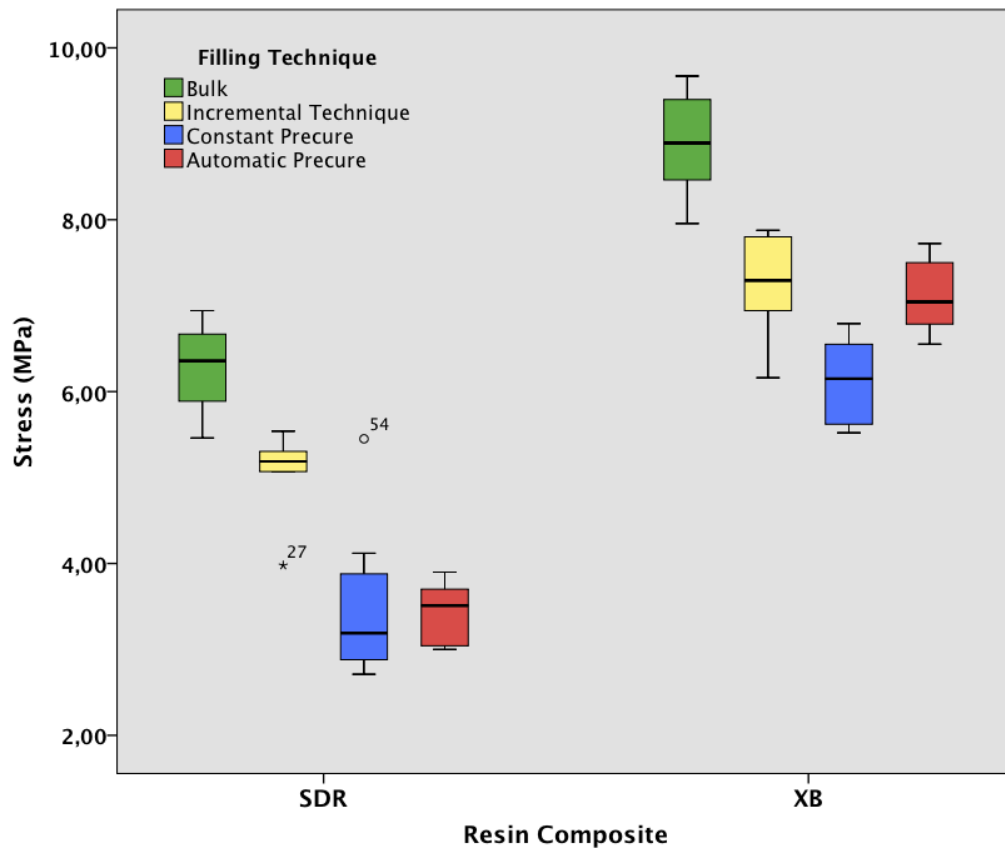


Abb. 5.6-1: Das Boxplot-Diagramm gibt einen Überblick über die Verteilung der Stresswerte für die verschiedenen Verarbeitungstechniken (bei Anwendung von SDR® und x-tra base).

Im Verlauf der Durchführung der Experimente wurden 6 Hypothesen aufgestellt:

1. Im Vergleich zur Verarbeitung laut Herstellerangabe beeinflusst die Schichttechnik den Stress nicht.
2. Im Vergleich zur Verarbeitung nach Herstellerangabe beeinflusst die konstante Vorbelichtung den Stress nicht.
3. Im Vergleich zur Verarbeitung nach Herstellerangabe beeinflusst die automatische Vorbelichtung den Stress nicht.

4. Im Vergleich zur Schichttechnik beeinflusst die konstante Vorbelichtung den Stress nicht.
5. Im Vergleich zur Schichttechnik beeinflusst die automatische Vorbelichtung den Stress nicht.
6. Im Vergleich zur konstanten Vorbelichtung beeinflusst die automatische Vorbelichtung den Stress nicht.

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS (Version 22). Bei der Analyse der Daten stellte sich heraus, dass diese bei mehreren Messreihen nicht normalverteilt waren. Dies zeigte der Kolmogorov-Smirnov Test sowie die Abweichung des Mittelwerts vom Medianwert. Deswegen wurde ein nichtparametrischer Test (Mann-Whitney-U-Test) für unverbundene Stichproben verwendet. Nach diesem Test müssen die Hypothesen 1 bis 4 auf hohem Signifikanzniveau verworfen werden ($p < 0,01$). Die Hypothese 5 konnte für das Material x-tra base nicht, für SDR® muss sie verworfen werden. Die Hypothese 6 konnte für das Material SDR® nicht, für x-tra base muss sie verworfen werden.

6. Diskussion

6.1 Diskussion der Methode

Das spannungsoptische Messverfahren hat sich bereits in vorangegangenen Dissertationen zum Vergleich der resultierenden Spannungen von verschiedenen Verarbeitungstechniken bewährt (*Klingler, 2004; Nötzel, 2008*). Es wurde auch bereits durch *Craig et al. (1967)*, *Kinomoto und Torii (1998)* und *Ernst et al. (2003)* als geeignetes Verfahren zur Spannungsmessung publiziert. Die Absolutwerte der in dieser Studie gemessenen Spannungen sind zwar nicht direkt vergleichbar mit Herstellerangaben oder anderen Literaturwerten, da hier meist eine zylindrische Kavität benutzt wird. Da wir jedoch in dieser Studie noch je eine Versuchsreihe mit zwei anderen, etablierten Füllungstechniken angefertigt haben (Blockfüllung nach Herstellerangaben sowie Schichttechnik) sind die resultierenden Spannungswerte durch die neue Applikationstechnik gut mit den Werten aus den zwei anderen Versuchsreihen vergleichbar. Das Besondere an der verwendeten Messapparatur ist, dass rotes Licht polarisiert und damit zum Messen verwendet wird. So ist es möglich, dass man eine Versuchskavität im Strahlengang füllen kann, ohne dass das rote Licht einen Einfluss auf die Polymerisation des Komposits nimmt (*Klingler, 2004*). Die Wellenlänge des roten Lichts ist nämlich nicht dazu fähig, die im Komposit enthaltenen Photoinitiatoren (meist Campherchinon) zu aktivieren. Außerdem ist die verwendete Messmethode aus folgendem Grund besonders geeignet für die Entwicklung einer neuen Applikationstechnik: die resultierenden Spannungen sind sofort auf dem Bildschirm sichtbar und schon nach 1000 s auswertbar. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, da es bei der Entwicklung einer neuen Methode sehr viele orientierende Versuche gibt und man sich langsam an den richtigen Weg herantasten muss. Anderenfalls stünde der Fortschritt bei der Entwicklung in keinem Verhältnis zu dem zeitlichen Aufwand bei der Spannungsmessung. Ein Nachteil der verwendeten Messapparatur besteht in dem hohen technischen Aufwand bei der Dokumentation. So wurde die Spannungsentwicklung auf Videoband aufgezeichnet und erst sekundär

digitalisiert. Da dies nicht dem aktuellen Stand der Technik entspricht, wird inzwischen bereits an einer Modernisierung der Apparatur gearbeitet.

Die in die Modellkavitäten eingebrachten Füllungen wiesen einen C-Faktor von 0,91 auf. Dieser C-Faktor war geeignet zur Messung der auftretenden Spannungen bei Verarbeitung laut Herstellerangaben und mit der Schichttechnik. Bei Anwendung der Vorpolymerisation jedoch zeigten sich sehr geringe Spannungswerte, insbesondere für das Material SDR®. Hier hätte eine modifizierte Kavitätengeometrie mit höherem C-Faktor eine „exaktere Differenzierung der entstehenden Polymerisationsschrumpfkraft“ (*Rullmann et al.*, 2012) ermöglicht. Das Vorgehen bei der Konditionierung der Versuchskavitäten hatte sich in den Studien von *Klingler (2004)* und *Nötzel (2008)* bewährt: Die Araldit B- Plättchen wurden angeraut und mit dem acetonehaltigen Bonding Agent Solobond M konditioniert. Von manchen Autoren wird zwar eine „tribochemische Silikatisierung“ der Kavitätenoberfläche empfohlen, „um eine adhäsive Verbindung der Komposite mit dem Trägermaterial sicherzustellen“ (*Rullmann et al.*, 2012). In unseren Versuchsreihen war jedoch keine einzige Füllung wegen Abriss des Komposits von dem Epoxidharz nicht auswertbar. Dies könnte durch einen deutlich geringeren C-Faktor (0,91) und konsekutiv geringeren Schrumpfkraften in unseren Versuchen erklärt werden, verglichen mit der Studie von *Rullmann et al.* (C-Faktor 2,4 und 4). Daher wurde dieser Aspekt der Kavitätenvorbehandlung hier ausgelassen. Die für die Aushärtung des Komposits benutzte Halogenlampe (Translux Energy, Heraeus Kulzer) wies mit ca. 600 mW/cm^2 eine für die Endhärtung ausreichende Lichtintensität auf. Ein Nachteil von Halogen-Polymerisationslampen ist, dass ihre Halogenbirne nach einer bestimmten Betriebsdauer versagt und einen deutlichen Leistungsabfall in ihrer Lichtintensität entwickelt (*Jandt und Mills*, 2013), wobei dieser Leistungsabfall leicht unbemerkt bleiben kann, da er für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Daher wurde die Lichtleistung während unserer Versuche regelmäßig kontrolliert (Broadband Power/Energy Meter (13 PEM001), Melles Griot, Rochester, NY, USA). LED-Lampen dagegen weisen eine konstante Abgabeleistung über die gesamte Lebensdauer der Leuchtdioden auf

(*Jandt et al.* 2000), jedoch kann eine LED-Polymerisationslampe nicht minutenlang eine konstante Lichtleistung erzeugen. Daher wurde der Versuch der „konstanten Vorpolymerisation“ mit einer Halogen-Polymerisationslampe durchgeführt. Die Halogenlampe wurde zur Endhärtung direkt auf das Araldit-Plättchen aufgelegt. Da die Versuchskavitäten allerdings nur bis 1 mm unter die Plättchenoberfläche aufgefüllt wurden, um eine maximale Schichtstärke von 4 mm zu gewährleisten, konnte die Polymerisationslampe nicht unmittelbar auf das Komposit aufgelegt werden. Hier könnte befürchtet werden, dass die Kompositproben nicht vollständig ausgehärtet wurden. *Gente et al.* (2007) konnten jedoch zeigen, dass eine ausreichende Aushärtungstiefe auch dann gegeben ist, „wenn der Lichtleiter nicht direkt auf dem auszuhärtenden Material positioniert werden kann“. Daher sollte der Abstand des Lichtleiters von 1 mm zu der Kompositoberfläche vernachlässigbar sein, da ja auch noch eine zusätzliche Lichthärtung von den beiden Seitenflächen erfolgte. Die in unserem Versuch verwendete Belichtungszeit von 60 s liegt deutlich über den Herstellerempfehlungen und ist daher mit Sicherheit ausreichend. Die Versuchsauswertung war in der Form, wie sie in dieser Studie durchgeführt wurde, neu. Die bisherigen spannungsoptischen Untersuchungen an der benutzten Messapparatur (*Klingler 2004, Nötzel 2008*) wurden ausgewertet, indem die jeweiligen Isochromaten auf Ausdrucken der spannungsoptischen Bilder per Hand eingezeichnet wurden. Die Spannung am Kavitätenrand wurde dann durch Extrapolation der in das Programm *Harvard Graphics 98* eingetragenen Werte ermittelt. Dieses Auswertungsverfahren wurde durch *Gente und Sultan* (Dissertation laufend) 2010 dadurch modernisiert und vereinfacht, dass die Festlegung der Isochromaten digital durch das Programm *Image J* erfolgte sowie die Extrapolation mit *Excel* (Microsoft Office). Durch die digitale Auswertung war eine einfachere Dokumentation der Versuchsauswertungen möglich, außerdem könnte diese Methode geringfügig genauer sein, da die Positionierung der Isochromaten nicht auf Papierbildern (Ausdrucken), sondern anhand von Helligkeitskurven erfolgte.

6.2 Diskussion der untersuchten Bulk-Fill Komposite

SDR® und x-tra base werben mit sehr niedrigen Schrumpfungswerten. Dabei weisen die beiden Materialien unterschiedliche Werte für die Polymerisations-schrumpfung und den E-Modul auf: Tabelle 6.2-1. Dies hat unter anderem einen Einfluss auf die Höhe des jeweils durch die Materialien erzeugten Polymerisationsstresses, denn dieser ist bei Anwendung des Materials SDR® deutlich geringer als bei Anwendung von x-tra base (Abb. 5.1-1 und 5.1-2). *Rullmann et al.* (2012) definierten die Polymerisationsschrumpfungskraft als eine vom Produkt aus E-Modul und Polymerisationsschrumpfung abhängige Größe (Kap. 2.2). Wendet man dieses Produkt auf die beiden Materialien x-tra base und SDR® an, wird deutlich, warum die beiden Materialien unterschiedliche Werte für den Polymerisationsstress erzeugen (Tab. 6.2-1): Das Produkt für x-tra base ist deutlich größer als das Produkt für SDR®. So hat sich die Erwartung, dass SDR® kleinere Spannungen aufbaut als x-tra base, bestätigt. In folgender Tabelle sind die für diese Studie relevantesten physikalischen Eigenschaften sowie das Produkt aus E-Modul und Polymerisationsschrumpfung aufgeführt:

Eigenschaft	x-tra base (VOCO)	SDR® (Dentsply)
E-Modul [MPa]	12600	5539
Füllstoffanteil [Gew.-%]	75	68
Druckfestigkeit [MPa]	357	242
Schrumpfung [Vol.- %]	2,54	3,5
Produkt E-Modul * Schrumpfung [MPa]	320,04	193,87

Tabelle 6.2-1: Die für unsere Studie wichtigsten physikalischen Eigenschaften der beiden untersuchten Komposite (nach Angaben der Hersteller).

Wie in Kapitel 2.5 schon erwähnt gelang es in der SDR®-Technologie mit Hilfe eines Polymerisationsmodulators, welcher in das Harzgrundgerüst eingebaut

wurde, den auftretenden Polymerisationsstress zu verringern. Dieser Polymerisationsmodulator sollte „dazu führen, dass die Monomere sich entspannter zu einem Netzwerk zusammenschließen und dabei ein hoher Konversionsgrad und eine hohe Vernetzungsdichte erreicht werden.“ (Rullmann et al., 2012).

X-tra base hat mit 75% einen größeren Füllstoffanteil als SDR®. Dies resultiert in signifikant geringeren Werten der Mikrohärte für SDR®, verglichen mit x-tra base (Giuliano et al., 2013). *Alrahlah et al.* (2014) beschreiben einen positiv linearen Zusammenhang zwischen der Vickershärte (HV) und dem Füllergehalt des Komposits. Im Material x-tra base werden relativ große Füllerpartikel von 20 µm eingesetzt, um bei gleichem Gesamtfüllergehalt die totale Fülleroberfläche zu verringern mit folglich kleinerem Füller-Matrix-Interface. Dies verringert die Lichtstreuung am Füller-Matrix-Interface und erlaubt so mehr Lichtpenetration in die Tiefe des Materials (*Ilie et al.* 2013). So kommt eine große Aushärtungstiefe bei nur 10 s empfohlener Belichtungszeit für x-tra base zustande. Nach *Alrahlah et al.* (2014) korreliert der Konversionsgrad mit der Lichtstreuung am Partikel-Matrix-Interface und der Lichtabsorption durch Photoinitiatoren. Dies lässt vermuten, dass x-tra base einen größeren Konversionsgrad erreicht. *Alshali et al.* (2013) stellten jedoch fest, dass der Konversionsgrad von SDR® mit denjenigen von konventionellen Kompositen vergleichbar ist, der Konversionsgrad von x-tra base dagegen fiel in dieser Studie geringer aus (DC immediately post-cure: SDR® = 58,4 %, x-tra base = 53,9 %; DC 24h post-cure: SDR® = 76,1, x-tra base 62,1). *Alshali et al.* erklären den unterschiedlichen Konversionsgrad damit, dass die beiden Komposite auf unterschiedlichen Monomer-Systemen basieren: UDMA-basierte Komposite haben aufgrund von unterschiedlichen funktionellen Gruppen eine geringere Viskosität als Bis-GMA basierte Komposite und eine erhöhte Reaktivität. Es resultiert ein geringerer Konversionsgrad für Bis-GMA basierte Komposite. Außerdem könnte laut *Alshali et al.* der hohe Füllergehalt von x-tra base zu einem niedrigen Konversionsgrad (anstatt zu einem hohen, wie von *Alrahlah et al.* 2014 vermutet) beitragen.

6.3 Diskussion der Ergebnisse

6.3.1 Diskussion der Bulk-Fill Applikation

Wie in den Abbildungen 5.1.1 und 5.1.2 zu erkennen ist, erzeugte vor allem SDR® bei Verarbeitung laut Herstellerangaben geringe Spannungswerte, verglichen mit den Untersuchungen von *Klingler* und *Nötzel* an konventionellen Kompositen (z. B. mittlere Spannung von 8,9 MPa bei 5 mm Blockfüllung mit Arabesk Top (Farbe A3, VOCO)). Es liegt eine geringe Streuung der einzelnen Messwerte vor (Standardabweichung 0,5 MPa für SDR® und 0,6 für x-tra base). Wie auch schon mehrfach publiziert (*Giuliano et al.*, 2013) ist erkennbar, dass die erzeugten Spannungen durch SDR® signifikant geringer ausfallen als die erzeugten Spannungen durch x-tra base (Mann-Whitney-U-Test, $p < 0,01$). Diese Tatsache lässt sich damit erklären, dass das E-Modul von x-tra base mit 12600 MPa mehr als doppelt so hoch ist als das E-Modul von SDR® (5539 MPa), auch wenn SDR rund 40 % höhere Schrumpfungswerte aufweist (siehe Tab. 6.2-1).

6.3.2 Diskussion der Schichttechnik

Die horizontale Schichttechnik führte in diesem Versuch, wie es auch schon durch zahlreiche Autoren beschrieben wurde (z.B. *Park et al.*, 2008; *Oliveira et al.*, 2013), zu einer deutlichen Reduktion der schrumpfungsbedingten Spannungen. So ist aus den Abbildungen 5.2.1 / 5.2.2 sowie 5.6.1 zu erkennen, dass durch ein portioniertes Einbringen und Aushärten eine Verringerung der Spannungswerte um 1,1 MPa (Mittelwert) für SDR® und 1,6 MPa (Mittelwert) für x-tra base erreicht wurde. Dies entspricht für beide Materialien einer Reduktion der schrumpfungsbedingten Spannungen um 18 %. Dies bestätigt die schon lange bekannte Tatsache, dass eine Spannungsminderung durch eine Verkleinerung der Kompositmasse, welche ausgehärtet wird, und Verkleinerung des C-Faktors, eintritt. Neu ist die Bestätigung, dass dieser Zusammenhang auch auf die beiden Bulk-Fill Komposite SDR® und x-tra base

zutrifft. Der Nachteil der Schichttechnik besteht hauptsächlich in dem großen Zeitaufwand.

6.3.3 Diskussion der Applikation unter Vorbelichtung

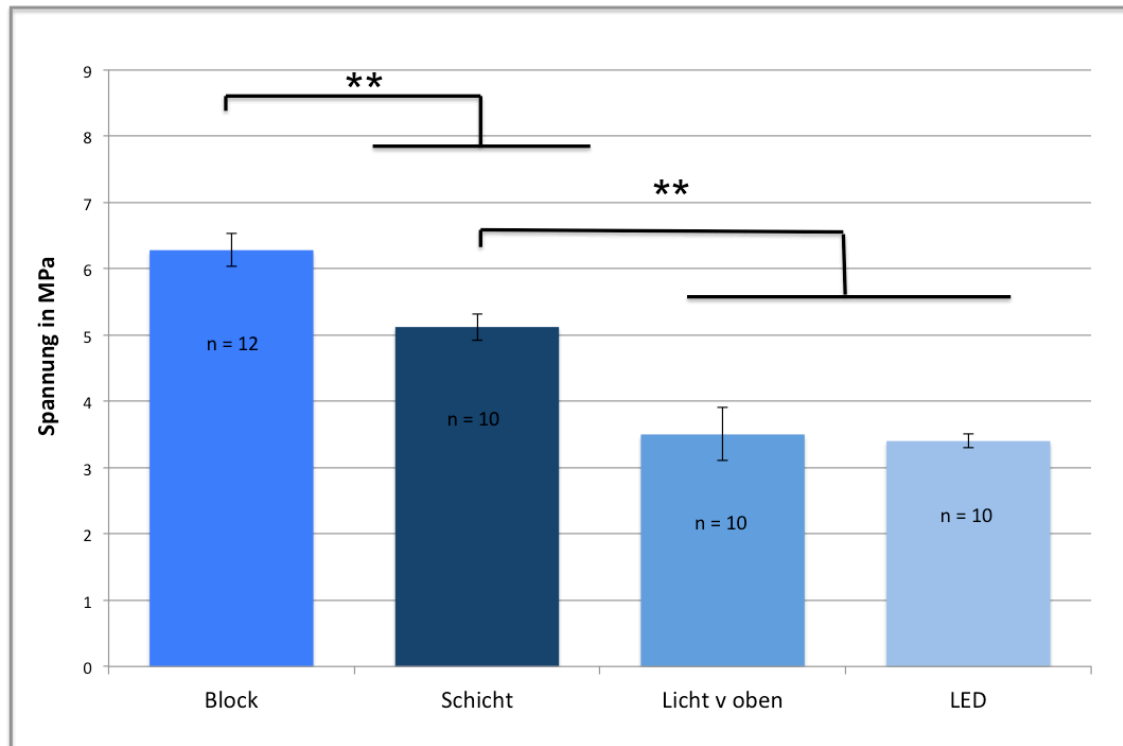


Abb. 6.3.3-1: Vergleich der Spannungswerte nach Anwendung von SDR® (in MPa nach 1000 s) für die verschiedenen Applikationsarten (Blockfüllung, Schichtfüllung, Vorpolymerisation mittels Halogenlampe und automatische Vorpolymerisation mit LED). Gezeigt sind jeweils die Mittelwerte mit Standardabweichung. Die Signifikanzbalken zeigen an, dass bei Schichtfüllung von SDR® hochsignifikant geringere Spannungswerte verglichen mit der Blockfüllung resultieren; außerdem sind die Spannungswerte sowohl nach konstanter als auch nach automatischer Vorbelichtung hochsignifikant geringer als bei Anwendung der Schichttechnik. Als Signifikanztest wurde der Mann-Whitney-U-Test angewendet ($p < 0,01$, siehe auch Kap. 5.6).

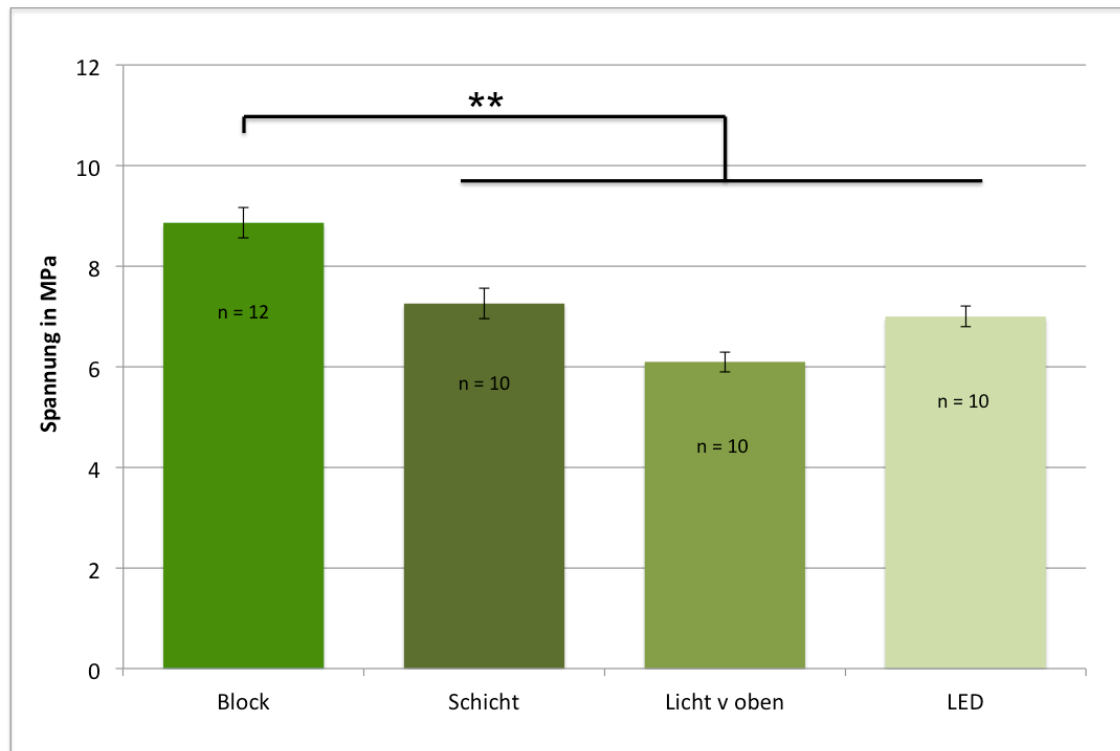


Abb. 6.3.3-2: Vergleich der Spannungswerte nach Anwendung von x-tra base (in MPa nach 1000 s) für die verschiedenen Applikationsarten (Blockfüllung, Schichtfüllung, Vorpolymerisation mittels Halogenlampe und automatische Vorpolymerisation mit LED). Gezeigt sind jeweils die Mittelwerte mit Standardabweichung. Die Signifikanzbalken zeigen an, dass bei Schichtfüllung von x-tra base hochsignifikant geringere Spannungswerte verglichen mit der Blockfüllung resultieren; außerdem sind die Spannungswerte sowohl nach konstanter als auch nach automatischer Vorbelichtung ebenfalls hochsignifikant geringer als bei Anwendung der Bulk-Technik. Als Signifikanztest wurde der Mann-Whitney-U-Test angewendet ($p < 0,01$, siehe auch Kap. 5.6).

Das gleichzeitige Belichten mit einer Halogen-Polymerisationslampe bei der Applikation (also die konstante Vorbelichtung) führte bei beiden Materialien zu einer signifikanten Spannungsreduktion, welche darüberhinaus größer war als die Spannungsreduktion durch die Schichttechnik. So konnte der Spannungswert bei Anwendung von x-tra base verglichen mit der Blockfüllung um 30 % gesenkt werden (Abb. 5.6-1 bzw. 6.3.3-2). Bei Anwendung von SDR®

wurde eine noch deutlichere Spannungsreduktion um 44 %, verglichen mit der Blockfüllung, erreicht (Abb. 5.6-1 bzw. 6.3.3-1). Das bedeutet, dass durch die Anwendung der Vorbelichtung eine deutlich größere Reduktion der Spannungen als durch Anwendung der Schichttechnik erreicht werden konnte. Das Material SDR® scheint durch Vorbelichtung noch günstiger in seiner Spannungsentwicklung beeinflussbar zu sein als das Material x-tra base. Dies könnte daran liegen, dass SDR® initial eine höhere Lichtempfindlichkeit aufweist als x-tra base (Abb. 3.1.1-1) und somit eventuell besser auf die Vorbelichtung anspricht. *Flury et al.* (2012) stellten allerdings fest, dass die von uns verwendete ISO 4049-Methode nicht unbedingt geeignet ist, um die Aushärtungstiefe von Bulk-Fill Kompositen zu bestimmen. Da jedoch beide Materialien unter gleichen Bedingungen getestet wurden, und für die genannte Fragestellung auch nicht die Absolutwerte der Aushärtungstiefen entscheidend sind sondern die Lichtempfindlichkeit der Materialien im Vergleich, sollte die verwendete Methode in Anlehnung an ISO 4049 ausreichend für eine Einschätzung der Lichtempfindlichkeit sein. Die Tatsache, dass für die Verarbeitung von x-tra base und SDR® jeweils andere Proportionalitätsfaktoren am Drehschalter des Analogcomputers eingestellt werden mussten, spricht ebenfalls dafür, dass die beiden Materialien eine unterschiedliche Lichtempfindlichkeit aufweisen. Für SDR® wurde die „Stufe 3“ gewählt; für x-tra base die „Stufe 4“ und damit war für die Applikation von x-tra base eine größere Helligkeit möglich.

Der „Messwert 10“ in Abb. 5.3-1 ist ein offensichtlicher Ausreißer und zeigt eine deutlich höhere Spannung in MPa als die anderen Messwerte. Dieser Ausreißer könnte damit erklärt werden, dass Polymerisationslampen ihr Licht nur sehr unregelmäßig auf Abstand abgeben und dass die Streuung des Lichtes unregelmäßig ist (*Heiland et al.*, 2011). So hat diese Füllung Nr. 10 möglicherweise weniger Licht zur Vorhärtung bekommen und weist daher einen größeren Spannungswert auf.

Im Versuch „Variation der Vorbelichtung“ wurde nach Anbringen einer LED an die Applikationspistole versucht, eine ideale Strom-Wirkungsbeziehung herauszufinden, um die automatische Lichtregulierung hinterher richtig einstellen zu können. Die grafische Darstellung der entstandenen Spannungen in Abhängigkeit von der verwendeten Stromstärke ergab für beide Versuchsmaterialien eine deutliche Abnahme der Spannungswerte für steigende Ströme (Abb. 5.4-1). Für eine Stromstärke von mehr als 60 mA konnte mit diesem einfachen Versuchsaufbau keine weitere Abnahme der Spannungswerte nachgewiesen werden. Daher wurde dies als Bezugswert bei der Einstellung der Stromverhältnisse gewählt.

Im Versuch „automatische Vorbelichtung“ wurde der Prototyp (Applikationspistole mit integrierter LED, gekoppelt an Analogcomputer-Steuer-einheit) getestet. Dazu wurden die Einfüllzeiten variiert und die resultierenden Spannungen gemessen. Hier wurde gezeigt, dass mit der automatischen Lichtregulierung eine von der Einfüllzeit unabhängige, fast konstante Spannungsreduktion bewirkt werden kann. So ist es möglich, sehr langsam oder sehr schnell zu applizieren. Auch subjektiv war das Einfüllen bei jeder Geschwindigkeit angenehm und ohne Probleme. Die Verwendung einer weißen LED war deutlich angenehmer für die Augen des Behandlers als die Verwendung einer blauen LED. Die Ausleuchtung des Arbeitsfeldes erscheint praktisch und könnte sogar einen weiteren Vorteil der integrierten Beleuchtung darstellen. Zusammenfassend lässt sich sagen:

1. Für die Applikation des fließfähigen Komposits mit automatischer Vorbelichtung wird nicht mehr Zeit benötigt als für die Bulkfüllung.
2. Dabei werden signifikant geringere Spannungen in der Modellkavität erzeugt als bei der Bulkfüllung; bei Anwendung von x-tra base auf dem Niveau der Schichttechnik, bei Anwendung von SDR® sogar noch signifikant darunter.

Auch in diesem Versuch ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Versuchsmaterialien zu erkennen, nämlich in der Wirksamkeit der automatischen LED-Vorbelichtung: Bei Anwendung des Materials SDR® konnte mit der automatischen LED-Vorpolymerisation der sehr geringe Spannungswert gehalten werden, welcher durch die konstante Vorpolymerisation erzeugt wurde (Abb. 6.3.3-1). Bei Anwendung von x-tra base fällt eine schlechtere Wirksamkeit der automatischen LED-Vorpolymerisation im Vergleich zur konstanten Vorpolymerisation auf (Abb. 6.3.3-2). Der erzeugte Schrumpfspannungswert liegt hier zwar immer noch auf dem Niveau der Schichttechnik und ist damit eine signifikante Verbesserung gegenüber der Bulk-Technik; jedoch stellt sich die Frage, in wie weit sich der Prototyp der neuen Applikationstechnik noch für das Material x-tra base optimieren lässt.

Auch eine Verarbeitung von anderen Bulk-Fill Materialien mit der neuen Applikationsmethode sollte in Zukunft erfolgen.

In der Literatur wird immer wieder die Vorbelichtung der Kompositfüllungen in Form von Softstart-Polymerisation oder Intervall-Belichtung als mögliche Ursache von verschlechterten physikalischen Eigenschaften der ausgehärteten Füllung vermutet. So könnte laut *Dewaele et al.* (2009) der Konversionsgrad nach Vorbelichtung herabgesetzt sein, bzw. könnte nach *Asmussen* und *Peutzfeld* (2003) die Anfälligkeit für ein Anlösen der Füllung durch Nahrungsbestandteile erhöht sein. Andere Studien wiederum konnten keine Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Komposits nach Vorbelichtung feststellen (*Mehl et al.* 1996, *Hofmann et al.* 2003). Es gibt bisher auch keinen Hinweis dafür, dass es einen negativen Einfluss auf die Eigenschaften der Füllung hat, wenn schon eine gewisse Dosis während der Verarbeitung bzw. Modellation des Komposits auf die Füllung trifft, zum Beispiel Tageslicht oder die OP-Leuchte. Wenn eine Vorbelichtung die Füllung negativ beeinflusst, würde das auch bedeuten, dass beim Aushärten einer großen Füllung (die zum Beispiel von mesial nach distal eines Molaren reicht und damit größer ist als der Durchmesser des Lichtleiters) die gesamte Fläche der Füllung gleichzeitig endgehärtet werden muss. Eine gewisse Lichtdosis (durch die

Lichtstreuung des Lichtleiters) trifft meist schon auf Bereiche der Füllung, bevor dieser Bereich durch direkte Bestrahlung des Lichtleiters endgehärtet wird. Das Komposit an dieser „vorbelichteten“ Stelle müsste schlechtere physikalische Eigenschaften haben als die zuerst gezielt belichtete Stelle. Auch dieser Gedanke wurde noch nie untersucht bzw. bestätigt. Dass das Komposit auch unter Belichtung gut an die Kavitätenwände anfließen und sich daher ein adäquater Haftverbund etablieren konnte, wurde durch die Auswertung des Spannungsmusters im Kavitätenmaterial sicher gestellt. Denn das für die Kavitätenform spezifische und symmetrische Spannungsmuster ergibt sich nur bei einem ausreichenden Haftverbund. An den Seitenflächen der Kavitäten, welche zum Befüllen mit Glasdeckplättchen verschlossen wurden, war nach Abnahme der Glasdeckplättchen ebenfalls eine völlig glatte und blasenfreie Oberfläche erkennbar.

6.3.4 Das 4-Phasen-Modell

Die Vorbelichtung während des Einfüllens des Komposits in die Kavität erzeugte bei dem gerade an die Kavitätenwände angeflossenen Komposit den Übergang in die Zwischenphase (Gelzustand). Dieses Material war dann nicht mehr fließfähig, aber auch noch nicht gehärtet. Es hat noch keine messbaren Schrumpfkraften aufgebaut (siehe Kap. 5.3), befand sich also erst am Übergang vom fließfähigen Zustand in die Zwischenphase. Offensichtlich sind in diesem Zustand schon deutliche Teile der Schrumpfung erfolgt, die durch nachkriechendes und nachfolgend eingefülltes Material kompensiert werden konnten. Das Dreiphasenmodell (Abb. 2.3-1) muss also durch eine vierte Phase ergänzt werden: Zwischen der Ausgangsphase und der Zwischenphase (welche Schrumpfkraften aufbaut) liegt noch eine Übergangsphase, in der das Komposit nicht mehr fließfähig oder modellierbar ist, aber durch „Kriechen“ im Bereich einiger μm Schrumpfungen kompensieren kann, ohne dass nennenswerte Kräfte auftreten.

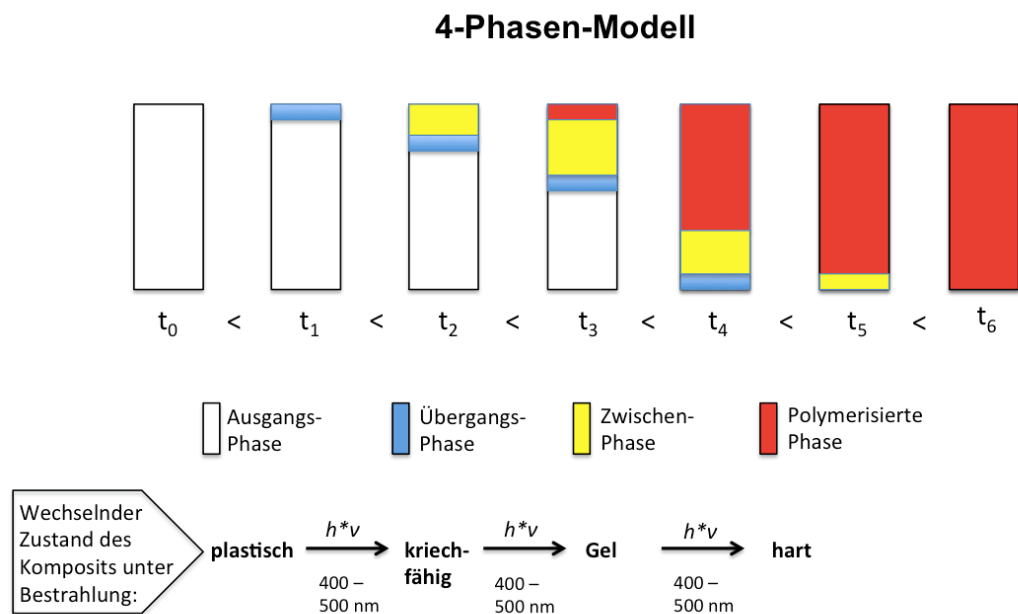


Abb. 6.3.4-1 zeigt das 4-Phasen-Modell. Dieses enthält im Vergleich zum 3-Phasen-Modell (Abb. 2.3-1) noch eine weitere Zustandsphase des Komposits, die sogenannte Übergangsphase. In diesem Zustand ist das Komposit nicht mehr plastisch verformbar, aber es kann noch im Bereich einiger μm kriechen.

Die Vorbelichtung überführt also das gesamte Füllmaterial in die Übergangsphase. Da in diesem Zustand schon ein Teil der Polymerisation und damit der Schrumpfung erfolgt ist, ergibt sich unter der Vorbelichtung eine geringere Spannung als bei der Bulk-Fill Methode.

6.4 Diskussion der Technischen Umsetzung und der Vorgehensweise bei der Entwicklung einer neuen Applikationstechnik

Diese Untersuchung erhebt nicht den Anspruch, ein neues Applikationsverfahren für fließfähige Komposite ausentwickelt zu haben. Sie sollte vielmehr den neuen Ansatz aufzeigen, Komposit schon beim Einfüllen zu Belichten und außerdem eine technische Umsetzung dieses Ansatzes erproben. Dabei wurden einfache technische Hilfsmittel mit sehr geringem finanziellen Aufwand verwendet. So wurde zuerst mit einem akustischen Messsystem überprüft, ob

es einen gewissen Spielraum vom Start der Belichtung bis zur Viskositätsveränderung durch die Polymerisation des Komposits gibt (Kapitel 4.3). Anderenfalls wäre ein Anfließen des Flowables an die Kavitätenwand nicht möglich. Ein blasenfreies Anfließen ist maßgeblich für die Ausbildung eines guten Haftverbundes zwischen Zahn und Restauration. Ob eine Belichtung während des Einfüllens auch praktisch realisierbar ist, wurde in einem einfachen Versuchsaufbau getestet, indem eine konventionelle Halogen-Polymerisationslampe an einer einfachen Stativklemme befestigt wurde (siehe Kap. 4.4.1.1). In diesem Versuchsaufbau konnte auch bereits getestet werden, ob die gleichzeitige Belichtung den gewünschten Effekt der reduzierten Schrumpfspannung erzeugt. Erst, als dieser bestätigt war, wurde in einem aufwendigen Schritt der Prototyp mit der automatischen Steuereinheit gebaut, es erfolgte also die technische Umsetzung. Die Schwierigkeit hierbei war, den schmalen Grad einer geeigneten Lichtintensität und –steuerung zu bestimmen. Wurde nämlich eine zu hohe Dosis Licht als Vorbelichtung auf das Komposit gegeben, konnte dieses nicht mehr vollständig an die Kavitätenwand anfließen, es wurde vorzeitig fest. Bei zu geringer Vorbelichtungs-Dosis zeigte sich wiederum kein Effekt im Sinne einer Reduktion der Spannungen. Daher musste die optimale Dosis experimentell ermittelt werden. Dabei fiel auf, dass das Material x-tra base eine höhere Dosis zur Vorpolymerisation benötigt als das Material SDR®, vermutlich da x-tra base initial eine geringere Lichtempfindlichkeit aufweist. Daher wurde der Analogcomputer so aufgebaut, dass der Proportionalitätsfaktor k verstellt werden und die Vorhärtungs-Dosis somit den unterschiedlichen Lichtempfindlichkeiten der beiden Versuchskomposite angepasst werden kann. Andere Parameter, wie zum Beispiel der Abstand der LED von dem Ausspritzröhrchen und eine mögliche Anbindung des Schiebepotentiometers an die Applikationspistole mussten ebenfalls experimentell ermittelt werden. So brauchte die Leuchtdiode einen gewissen Abstand zur Öffnung des Ausspritzröhrchens, da sonst ein Auffüllen der engen Versuchskavitäten nicht möglich war. Wurde die Leuchtdiode jedoch zu weit entfernt von der Öffnung des Röhrchens angebracht, zeigte sich durch die starke Lichtstreuung keine Gelbfärbung des Komposits mehr. Auch das

Schiebepotentiometer durfte keine Beeinträchtigung des Komforts bei der Applikation bewirken. In Zukunft sollte eine Untersuchung mit weiteren fließfähigen Bulk-Fill Kompositen erfolgen, außerdem eine weitere Verfeinerung der Steuereinheit. Ein Nachteil der hier dargestellten Vorbelichtungs-Technik ist, dass eine spezielle Applikationspistole benötigt wird, welche über ein Kabel mit der automatischen Steuereinheit verbunden ist. Hier wäre eine Weiterentwicklung zu einer Applikationspistole, in die eine miniaturisierte Steuereinheit integriert ist, von Vorteil.

7. Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung (deutsch)

Die Polymerisationsschrumpfung und die resultierenden Spannungen im Zahn stellen heute immer noch eine häufige Ursache für das Versagen von Kompositfüllungen dar. Daher beschäftigt sich die Kompositforschung seit vielen Jahren mit diesem Problem.

Um eine adäquate Haftung der Füllung am Zahn sowie eine ausreichende Durchhärtung des Materials zu gewährleisten, ist die Anwendung der Schichttechnik bei Verwendung eines herkömmlichen Komposits heute Stand der Technik. Diese Technik ist jedoch zeitaufwendig. Zur Zeitersparnis bei der Füllung von großen Kavitäten kamen vor einigen Jahren die sogenannten Bulk-Fill Komposite auf den Markt, welche sich seither steigender Beliebtheit erfreuen. Die zwei Bulk-Fill Materialien SDR® (Dentsply DeTrey, Konstanz, Deutschland) und x-tra base (VOCO, Cuxhaven, Deutschland) wurden in dieser Studie als exemplarische Bulk-Fill Flowables untersucht.

Basierend auf dem Gradientenmodell nach Sommer und Gente wurde die Hypothese aufgestellt, dass die polymerisationsschrumpfbedingten Spannungen durch gleichzeitige Belichtung (=Vorbelichtung) signifikant reduziert werden können. Dies gelingt durch Erzeugung der Gelphase des Versuchskomposits, direkt nachdem es an die Kavitätenwand anfließen konnte. Durch dieses Vorgehen soll der „Gelschrumpf“ des schon applizierten Materials durch nachfließendes Material kompensiert werden. Dabei ist das richtige Maß an Belichtung entscheidend für den Erfolg. Als Vergleichsbasis diente die Verarbeitung nach Herstellerangabe (Bulk-Technik) sowie die Schichttechnik. Die Spannungsmessung erfolgte mithilfe der etablierten spannungsoptischen Methode.

Die vorliegende Studie soll einen neuen Ansatz zur Spannungsreduktion aufzeigen und eine erste technische Umsetzung der oben beschriebenen Applikationsweise erproben.

Dies gelang durch die Montage einer weißen LED an die Applikationspistole. Durch die Verwendung eines Analogcomputers wurde eine automatische Regulierung der Belichtung realisiert, sodass das Material mit variabler Geschwindigkeit appliziert werden kann. Diese Applikationseinrichtung wurde von Prof. Dr. M. Gente und mir als Erfindung gemeldet, von der Philipps-Universität in Anspruch genommen und sowohl national als auch international zum Patent angemeldet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen eine signifikante Reduktion der Spannungen bei Anwendung der Vorbelichtung. Eine insgesamt schlüssige Erklärung der beobachteten Spannungsreduktion konnte durch eine Erweiterung des Gradientenmodells von Sommer und Gente von drei auf vier Phasen gegeben werden.

Die Vorbelichtung war unterschiedlich effektiv für die beiden untersuchten Bulk-Fill Materialien. So ist bei Anwendung von x-tra base mit Vorbelichtung die Spannungsreduktion so effektiv wie die Anwendung der Schichttechnik; bei Anwendung von SDR® mit Vorbelichtung konnten sogar noch signifikant geringere Spannungswerte erreicht werden. In Zukunft wird also eine Verfeinerung der technischen Umsetzung dieses vielversprechenden Ansatzes erfolgen, ebenso sollte die Anwendbarkeit auf andere Materialien untersucht werden.

7.2 Abstract (English)

The polymerisation shrinkage and the resulting stress in teeth is one of the most frequent reasons of composite restorations failing today. Therefore, the composite research has been dealing with this problem for years.

To reach a suitable adhesion of the filling and a sufficient polymerisation of the composite, the incremental technique (by using a conventional composite) is state of the art. However, this technique is time-consuming. To save time when filling big cavities, so-called bulk-fill composites were launched several years ago and became increasingly popular. For this study the two bulk-fill composites SDR® (Dentsply DeTrey, Konstanz, Germany) and x-tra base (VOCO, Cuxhaven, Germany) were researched.

Based on the “Gradientenmodell” by *Sommer* and *Gente* we hypothesized that precuring the composite during application could reduce the stress significantly. This is achieved by inducing the gel-phase of the composite immediately after its adaption to the cavity wall. Using this method the “gel-shrinkage” of the composite applied before should be reduced by the subsequent flow of the material. The appropriate amount of light is crucial for the success. Basis of comparison was the bulktechnique (according to the manufacturer’s information) and the incrementaltechnique. The stress measurement was performed by using the established photoelastic method.

The present study is believed to demonstrate a new solution to reducing stress and show a first technical implementation of the aforementioned method.

This was achieved by putting a white LED onto the application gun. By using an analogue computer an automated adjustment of the curing light was reached, and the composite could be applied at variable speeds. This application method and device were registered as an invention by Prof. Dr. M. Gente and myself. The Philipps-University (Marburg, Germany) applied it for a patent.

The results of the research show a significant reduction of the stress by using the precuringtechnique. An overall conclusive explanation of the observed stress reduction could be made by the extension of the „Gradientenmodell“ by *Sommer* and *Gente* from three to four phases.

A difference in the effectiveness of the precuringtechnique between the two bulk-fill materials arised. Using x-tra base with precuringtechnique is as effective as the incrementaltechnique; using SDR® with precuringtechnique achieved even significantly lower stress results. In future an improvement of the technical realization of this promising method will follow. Likewise the feasibility of other composites should be looked at.

8. Veröffentlichungen

Teile dieser Dissertation wurden in Form eines Posters und einer Präsentation vorgestellt sowie zum Patent angemeldet (Deutschland):

1. Vortrag bei der VOCO Dental Challenge 2012 (Firma VOCO, Cuxhaven, Deutschland), ausgezeichnet mit dem 1. Preis, S. Dudda:
„Optimierung der Kompositverarbeitung zur Reduktion schrumpfungsbedingter Spannungen“
2. 91. General Session and Exhibition of the International, American and Canadian Associations for Dental Research 2013 (Seattle, WA, USA)
S. Dudda, M. Gente: **„Reduction of Polymerization Stress of Composite-Resin by a Computer-controlled Precure-Technique“**
Abstract:
<https://iadr.confex.com/iadr/13iags/webprogram/Paper172321.html>
3. Nationale Patentanmeldung : Aktenzeichen des DPMA:
DE102012018384.4, Tag der Einreichung: 18.9.2012, am 30.7.2012 wurde die Erfindung von der Philipps-Universität Marburg in Anspruch genommen,
Titel: Vorrichtung und Verfahren zur Applikation für Komposit
Veröffentlichungsnummer DE 10 2012 018 384 A1
4. Europäische Patentanmeldung: PCT-Aktenzeichen: PCT/EP2013/069383,
Eingangsdatum 18.9.2013, **Titel: Vorrichtung und Verfahren zur Applikation von Lichtkompositen**
Veröffentlichungsnummer WO 2014/044711 A1

9. Literaturverzeichnis

1. Alrahlah A.,
Silikas N.,
Watts DC. : **Post-cure depth of cure of bulk fill dental resin-composites.**
Dent Mater (30) 2014; 149-154
2. Alshali RZ.,
Silikas N.,
Satterthwaite JD. : **Degree of conversion of bulk-fill compared to conventional resin-composites at two time intervals.** Dent Mater (29) 2013; e213-e217
3. Alster D.,
Feilzer AJ.,
Gee AJ. De,
Davidson CL. : **Polymerization contraction stress in thin resin composite layers as a function of layer thickness.** Dent Mater (13) 1997; 146-150
4. Althaus A. : **Eine Methode zur Verlängerung der Verarbeitungszeit von lichthärtendem Komposit.** Med. Diss. Marburg, 2008
5. Asmussen E.,
Peutzfeldt A. : **Two-step curing: influence on conversion and softening of a dental polymer**
Dent Mater (19) 2003; 466-470
6. Asmussen E.,
Peutzfeldt A. : **Class I and Class II restorations of resin composite: An FE analysis of the influence of modulus of elasticity on stresses generated by occlusal loading**
Dent Mater (24) 2008; 600-605

7. Asmussen S.,
Arenas G.,
Cook WD.,
Vallo C. :
**Photoinitiation rate profiles during
polymerization of a dimethacrylate-based
resin photoinitiated with
camphorquinone/amine. Influence of initiator
photobleaching rate**
European Polymer Journal (45) 2009; 515-522
8. Baier B. et al. :
**Die Aushärtungstiefe von Komposit in
Abhängigkeit von der applizierten Lichtdosis**
Deutscher Zahnärztetag 2010; Poster
9. Baroudi K.,
Saleh AM.,
Silikas N.,
Watts DC.
**Shrinkage behaviour of flowable resin-
composites related to conversion and filler-
fraction**
J Dent (35) 2007; 651-655
10. Bausch JR. et al. :
**Clinical significance of polymerization
shrinkage of composite resins**
J Prosth Dent (48) 1982; 59-66
11. Boaro LCC. et al. :
**Polymerization stress, shrinkage and elastic
modulus of current low-shrinkage restorative
composites**
Dent Mater (26) 2010; 1144-1150
12. Braga R.,
Ballester RY.,
Ferracane J. :
**Factors involved in the development of
polymerization shrinkage stress in resin-
composites: A systematic review**
Dent Mater (21) 2005; 962-970

13. Campos EA. et al. : **Marginal adaptation of class II cavities restored with bulk-fill composites.** J Dent (2242) 2014
14. Caughman WF. et al. : **Correlation of cytotoxicity, filler loading and curing time of dental composites**
Biomaterials (12) 1991; 737-740
15. Craig RG.,
El-Ebrashi MK.,
LePeak PJ.,
Peyton FA. : **Experimental stress analysis of dental restorations**
J Pros Dent (17) 1967; 277-291
16. Cunha LG. et al. : **Contraction stress and physical properties development of a resin-based composite irradiated using modulated curing methods at two C-factor levels**
Dent Mater (24) 2008; 392-398
17. Dewaele M. et al. : **Influence of curing protocol on selected properties of light-curing polymers: Degree of conversion, volume contraction, elastic modulus, and glass transition temperature**
Dent Mater (25) 2009; 1576-1584
18. Ernst CP. et al. : **Reduction of Polymerization Shrinkage Stress and Marginal Microleakage Using Soft-Start Polymerization**
J Esthet Restor Dent (15) 2003; 93-10

19. Finan L. et al. : **The influence of irradiation potential on the degree of conversion and mechanical properties of two bulk-fill flowable RBC base materials**
Dent Mater (29) 2013; 906-912
20. Flury S. et al. : **Depth of cure of resin composites: Is the ISO 4049 method suitable for bulk fill materials?**
Dent Mater (28) 2012; 521-528
21. Frankenberger R. : **Innovationen bei Komposit: Was ist dran an Siloran, Flowable und Bulk-Fill-Flow?**
Deutscher Zahnärzte Kalender (70. Jahrgang) 2011, 13-21
22. Frankenberger R. : **Adhäsiv-Fibel**, 2. Auflage 2010, Spitta Verlag
23. Frankenberger R. : **Adhäsive Zahnheilkunde**, 1. Auflage 2013, Deutscher Zahnärzte Verlag
24. Gee AJ. de,
Davidson CL.,
Smith A. : **A modified dilatometer for continuous recording of volumetric polymerization shrinkage of composite restorative materials**
J Dent (9) 1981; 36-42
25. Gente M. et al. : **Der Einfluss des Polymerisationslampentyps auf die Aushärtungstiefe dentaler Kompositfüllungen**
Journal: ZWR – Das Deutsche Zahnärzteblatt; 116 (9) 2007

26. Gente M.,
Sommer AP. : **Verringerung der linearen Schrumpfung
lichthärtbarer Komposite durch selektive
Bestrahlung**
Dtsch Zahnärztl Z (54) 1999; 729-731
27. Giuliano C. et al. : **Micro-hardness and contraction stress
evaluation of bulk-fill resins composites**
Dent Mater (29S) 2013; e41 (85)
28. Guimaraes T.,
Gushiken NO.,
Braga RR. : **Degree of conversion, flexural modulus and
polymerization stress of „Bulk Fill“
composites**
Dent Mater (29S) 2013; e43 (88)
29. Haas U. : **Physik**, 7. Auflage 2012,
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart,
546-556
30. Heiland K.,
Boldt J.,
Pont K.,
Gente M. **Die Aushärtungstiefen von Komposit in
Abhängigkeit von der Bestrahlungsrichtung**
ZWR – Das Deutsche Zahnärzteblatt;
120 (4) 2011; 142-146
31. Hofmann N.,
Denner W.,
Hugo B.,
Klaiber B. : **The influence of plasma arc vs. halogen
standard or soft-start irradiation on
polymerization shrinkage kinetics of polymer
matrix composites**
J Dent (31) 2001; 383-393

32. Hofmann N.,
Renner J.,
Hugo B.,
Klaiber B. **Elution of leachable components from resin composites after plasma arc vs. standard or soft-start halogen light irradiation**
J Dent (30) 2002; 223-232
33. Ilie N.,
Keßler A.,
Durner J. : **Influence of various irradiation processes on the mechanical properties and polymerisation kinetics of bulk-fill resin based composites**
J Dent (41) 2013; 695-702
34. Ilie N., Durner J. : **Polymerisation kinetics in bulk-fill resin-based composites.** Dent Mater (29S) 2013; e43 (89)
35. Ilie N., Hickel R. **Investigations on a methacrylate-based flowable composite based on the SDR™ technology**
Dent Mater (27) 2011; 348-355
36. Jandt KD.,
Mills RW.,
Blackwell GB.,
Ashworth SH. : **Depth of cure and compressive strength of dental composites cured with blue light emitting diodes (LEDs)**
Dent Mater (16) 2000; 41-47
37. Jandt KD., Mills RW.: **A brief history of LED photopolymerization**
Dent Mater (29) 2013; 605-617
38. Kim MH.,
Min SH.,
Ferracane J.,
Lee IB. : **Initial dynamic viscoelasticity change of composites during light curing**
Dent Mater (26) 2010; 463-470

39. Kinomoto Y.,
Torii M. : **Photoelastic analysis of polymerization contraction stresses in resin composite restorations**
J.Dent. (26) 1998; 165-171
40. Klingler K. : **Entwicklung und erste Anwendung einer spannungsoptischen Messeinrichtung zur Beobachtung von polymerisations-schrumpfbedingten Spannungen**
Med. Diss. Marburg, 2004
41. Kwon Y.,
Ferracane J.,
Lee I-B. : **Effect of layering methods, composite type, and flowable liner on the polymerization shrinkage stress of light cured composites**
Dent Mater (28) 2012; 801-809
42. Leprince JG. et al. : **New insight into the „depth of cure“ of dimethacrylate-based dental composites**
Dent Mater (28) 2012; 512-520
43. Lohbauer U. et al. : **The effect of resin composite pre-heating on monomer conversion and polymerization shrinkage**
Dent Mater (25) 2009; 514-519
44. Marxkors R.
Meiners H.
Geis-Gerstorfer J. : **Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde,**
5. Auflage 2005, Deutscher Zahnärzte Verlag

45. Mehl A.,
Hickel R.,
Kunzelmann KH. : **Physical properties and gap formation of light-cured composites with and without „softstart-polymerization“**
J Dent (25) 1997; 321-330
46. Moorthy A. et al : **Cuspal deflection and microleakage in premolar teeth restored with bulk-fill flowable resin-based composite base materials.**
J Dent (40) 2012; 500-505
47. Nikolaenko SA. et al.: **Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin**
Dent Mater (20) 2004; 579-585
48. Nötzel, M. : **Untersuchungen zu dem Einfluss von Verarbeitungstechniken lichthärtender Komposite auf polymerisationsbedingte Spannungen in Modellkavitäten**
Med. Diss. Marburg, 2008
49. Oliveira KMC.,
Lancellotti ACRA.,
Ccahuana-Vásquez
RA., Simonides C. : **Influence of filling techniques on shrinkage stress in dental composite restorations**
J Dent Scien (8) 2013; 53-60
50. Oliveira LCA.,
Duarte S. (Jr.),
Araujo CA.,
Abrahão A. **Effect of low-elastic modulus liner and base as stress-absorbing layer in composite resin restorations**
Dent Mater (26) 2010; e159-e169

51. Park J.,
Chang J.,
Ferracane J.,
Lee IB. : **How should composite be layered to reduce shrinkage stress: Incremental or bulk filling?**
Dent Mater (24) 2008; 1501-1505
52. Park YJ.,
Chae KH.,
Rawls HR. : **Development of a new photoinitiation system for dental light-cure composite resins**
Dent Mater (15) 1999; 120-127
53. Roggendorf MJ. et al. : **Marginal Quality of flowable 4-mm base vs. conventionally layered resin composite.**
J Dent (39) 2011; 643-647
54. Rullmann I. et al. : **Spannungsoptische Messungen der Polymerisationsschrumpfungskraft schrumpfreduzierter Komposite**
Schweiz Monatsschr Zahnmed (122) 2012; 300-304
55. Rumsey D. : **Statistik für Dummies**, 2. Auflage 2010,
Viley-VCH Verlag, Weinheim
56. Sakaguchi RL.,
Versluis A.,
Douglas WH. **Analysis of strain gage method for measurement of post-gel shrinkage in resin composites**
Dent Mater (13) 1997; 233-239
57. Satterthwaite JD.,
Alshali R.,
Silikas N. : **Water sorption of flowable bulk fill versus conventional resin composites**
Dent Mater (29S) 2013; e57 (116)

58. Satterthwaite JD.,
Maisuria A.,
Vogel K.,
Watts DC. : **Effect of resin-composite filler particle size and shape on shrinkage-stress**
Dent Mater (28) 2012; 609-614
59. Schattenberg A. et al. : **Minimal exposure time of different LED-curing devices**
Dent Mater (24) 2008; 1043-1049
60. Seibt W. : **Physik für Mediziner**, 6. Auflage 2009,
Thieme, 366-373
61. Sommer AP.,
Gente M. : **Lichtinduzierte Steuerung der Polymerisationsschrumpfung von Dental-Kompositen durch die Erzeugung temporärer Härtegradienten**
Biomed. Technik (44) 1999; 290-293
62. Stahl F.,
Ashworth SH.,
Jandt KD.,
Mills RW. : **Light-emitting diode (LED) polymerisation of dental composites: flexural properties and polymerisation potential**
Biomaterials (21) 2000; 1379-1385
63. Stoll R.,
Gente M.,
Palichleb M.,
Stachniss V. : **On the effect of an internal light conductor on the marginal integrity of class-II composite fillings**
Dent Mater (23) 2007; 145-152
64. Uhl A.,
Mills RW.,
Rzanny AE.,
Jandt KD.: **Time dependence of composite shrinkage using halogen and LED light curing**
Dent Mater (21) 2005; 278-286

65. Uhl A.,
Mills RW.,
Jandt KD. : **Photoinitiator dependent composite depth of cure and Knoop hardness with halogen and LED light curing units**
Biomaterials (24) 2003; 1787-1795
66. Visvanathan A.,
Ilie N.,
Hickel R.,
Kunzelmann KH. : **The influence of curing times and light curing methods on the polymerization shrinkage stress of a shrinkage-optimized composite with hybrid-type prepolymer fillers**
Dent Mater (23) 2007; 777-784
67. Watts DC.,
Satterthwaite JD. **Axial shrinkage-stress depends upon both C-factor and composite mass**
Dent Mater (24) 2008; 1-8
68. Weiß C.,
Bauer AW. : **Promotion**, 3. Auflage 2008, Thieme
69. Yoshikawa T.,
Burrow MF.,
Tagami J. : **A light curing method for improving marginal sealing and cavity wall adaptation of resin composite restorations**
Dent Mater (17) 2001; 359-366

10. Materialverzeichnis

- ACDSee Software (Fa. ACD, Seattle, USA)
- Akustisches Messsystem nach A. Althaus und M. Gente (siehe Med. Diss. Althaus, 2008)
- Araldit B Platten (Fa. Tiedemann, Garmisch-Patenkirchen)
- Bonding Heliobond (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein)
- Bonding Solobond M solo (Fa. VOCO, Cuxhaven)
- Broadband Power/Energy Meter (13 PEM001) (Melles Griot, Rochester, NY, USA)
- Deckglas-Plättchen (Fa. Kobe, Marburg)
- Diamantiertes Schleifinstrument (Fa. Busch)
- Excel und Word (Microsoft Office 2010)
- Halogen-Polymerisationslampe Translux (Fa. Heraeus Kulzer, Wehrheim)
- ImageJ Software (RSB, USA)
- LED-Polymerisationslampe Celalux (VOCO, Cuxhaven)
- Leuchtdiode weiss, Typ: NSPW 500 DS 5 mm (Conrad Electronic SE, Hirschau)
- SDR Komposit (Dentsply DeTrey, Konstanz)
- Spannungsoptische Messeinrichtung, nach K. Klingler, M. Nötzel und M. Gente (siehe Med. Diss. Klingler 2004 und Med. Diss. Nötzel 2008), inklusive allen technischen Geräten und Filtern
- Stativklemme (Archivbestand Zahnklinik Marburg)
- Stromquelle mit Regler (Standardnetzgerät regelbar)
- VHS-Kassetten E-240 (Fa. Kodak)
- X-tra base Komposit (VOCO, Cuxhaven)

11. Danksagung

Ganz besonders möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. (apl.) Dr. M. Gente für die Überlassung des interessanten Dissertationsthemas und die großartige Betreuung danken. Vielen Dank, dass Sie mit unendlicher Geduld junge Menschen zum forschen motivieren. Es hat Spaß gemacht, mit Ihnen zusammen zu arbeiten. Sie waren der beste Doktorvater, den ich mir hätte vorstellen können und ich habe sehr viel von Ihnen gelernt. Dafür sage ich: Dankeschön!

Außerdem möchte ich meiner Familie danken für die tolle Unterstützung während meines Studiums und der Arbeit an der Dissertation. Ob mental oder finanziell, mir hat es an nichts gefehlt. Danke, dass ihr immer an mich glaubt. Ich hab euch lieb!

Meinem Freund Patricio danke ich dafür, dass du mich auch in schwierigen Zeiten immer wieder motiviert hast. Du bist mein Fels in der Brandung.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Feinmechanikermeister Heimann bedanken, welcher mir mit viel Geschick und hoher Präzision im technischen Bereich geholfen hat. Herrn Dr. Roggendorf danke ich herzlich für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung.

Der Firma VOCO danke ich für die Unterstützung bei der internationalen Publikation. Den Firmen Dentsply Detrey und VOCO danke ich für die großzügige Überlassung des Komposits.

12. Verzeichnis der akademischen Lehrer

Meine akademischen Lehrer waren die Damen und Herren:

Arweiler, Braun, Cetin, Czubayko, Draenert, Feuser, Frankenberger, Gente, Gloerfeld, Höffken, Kinscherf, Koolmann, Korbmacher, Lamp, Lill, Lotzmann, Mengel, Milani, Mittag, Moll, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Pieper, Ramaswamy, Richter, Steiniger, Teymoortash, Weihe, Weber, Westermann, Wrocklage

13. Anhang

Bulkfüllung unter Anwendung von SDR:

Probennr	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in MPa
1	2,4	2,6	2,2	2,4	5,6
2	2,3	3	2,8	2,7	5,4
3	3,2	2,9	2,8	3	7,5
4	2,8	2,7	2,4	2,6	6,6
5	3	2,7	2,9	2,9	7,0
6	3	2,8	2,7	2,8	7,0
7	3	3	2,7	2,9	7,0
8	2,6	2,2	2,2	2,3	6,1
9	2,6	2,8	2,7	2,7	6,1
10	2,7	2,9	2,7	2,8	6,3
11	2,7	2,9	2,6	2,7	6,3
12	2,5	2,3	2,3	2,4	5,9

Bulkfüllung unter Anwendung von x-tra base:

Probennr	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in Mpa
1	3,5	3,6	3,5	3,5	8,2
2	3,8	3,7	4,1	3,9	8,9
3	3,5	3,8	3,8	3,7	8,2
4	4,4	3,9	3,7	4,0	10,3
5	3,4	3,6	3,2	3,4	8,0
6	4,2	4,2	4	4,1	9,8
7	4,2	4,1	4	4,1	9,8
8	3,7	3,8	3,6	3,7	8,7
9	3,5	3,7	3	3,4	8,2
10	3,6	3,9	3,7	3,7	8,4
11	4,2	3,8	4,1	4,0	9,8
12	3,8	3,9	3,9	3,9	8,9

Schichtfüllung unter Anwendung von SDR:

Probennr	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in Mpa
1	2,3	2,2	2,3	2,3	5,4
2	2,4	2,5	2,1	2,3	4,9
3	1,7	1,8	1,6	1,7	3,7
4	2,3	2,2	2,1	2,2	4,9
5	2,1	2,3	2,2	2,2	5,1
6	2,4	2,2	2,2	2,3	5,1
7	2,1	2,1	2,3	2,2	5,4
8	2,4	2,5	2,2	2,4	5,1
9	2,1	2,4	2,2	2,2	5,1
10	2,1	2,3	2,1	2,2	4,9

Schichtfüllung unter Anwendung von x-tra base:

Probennr	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in Mpa
1	3,3	3,4	3,2	3,3	7,5
2	3,6	3,6	2,9	3,4	6,8
3	3,6	3,3	3,2	3,4	7,5
4	2,8	2,8	3,3	3,0	7,7
5	2,9	2,2	2,8	2,6	6,6
6	2,9	2,7	2,7	2,8	6,3
7	2,9	3,6	3,5	3,3	8,2
8	2,9	3,3	3	3,1	7,0
9	2,8	3,4	3	3,1	7,0
10	3	2,9	3,6	3,2	8,4

Konstante Vorbelichtung unter Anwendung von SDR:

Probennr	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in Mpa
1	1,3	1,3	1,2	1,3	3,0
2	1,2	1,3	1,2	1,2	2,9
3	1,3	1,3	1,3	1,3	3,0
4	1,2	1,1	1,2	1,2	2,7
5	1,3	1,5	2,2	1,7	3,9
6	1,6	1,6	2,1	1,8	4,1
7	1,3	1,2	1,2	1,2	2,9
8	1,7	1,6	1,6	1,6	3,8
9	1,4	1,3	1,6	1,4	3,3
10	2,6	2,3	2,1	2,3	5,5

Konstante Vorbelichtung unter Anwendung von x-tra base:

Probennr	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in Mpa
1	2,4	2,2	2,5	2,4	5,5
2	2,5	2,2	3,1	2,6	6,1
3	2,7	2,4	2,8	2,6	6,2
4	2,6	3,3	2,8	2,9	6,8
5	2,3	2,2	2,7	2,4	5,6
6	2,4	2,9	2,7	2,7	6,2
7	2,5	3	3	2,8	6,6
8	2,9	2,3	2,7	2,6	6,2
9	2,2	2,2	2,8	2,4	5,6
10	2,8	2,8	2,8	2,8	6,6

Automatische Vorbelichtung unter Anwendung von SDR:

Probennr	Zeit in s	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in Mpa
1	19	1,4	1,4	1,6	1,5	3,51
2	28	1,2	1,4	1,3	1,3	3,042
3	25	1,4	1,4	1,6	1,5	3,51
4	40	1,4	1,3	1,3	1,3	3,042
5	30	1,6	1,4	1,6	1,5	3,51
6	48	1,4	1,4	1,6	1,5	3,51
7	31	1,4	1,2	2,1	1,6	3,744
8	44	1,3	1,3	1,3	1,3	3,042
9	37	1,6	1,5	1,7	1,6	3,744
10	35	1,6	1,7	1,7	1,7	3,978

Automatische Vorbelichtung unter Anwendung von x-tra base:

Probennr	Zeit in s	rechts	links	unten	MW in Ordnungen	MW in Mpa
1	32	3,1	2,8	2,8	2,9	6,786
2	23	3,2	3,2	3,1	3,2	7,488
3	35	2,9	3,1	2,4	2,8	6,552
4	41	3	2,9	2,9	2,9	6,786
5	18	3,6	3,4	2,8	3,3	7,722
6	34	2,8	3,1	2,8	2,9	6,786
7	28	3,2	3,2	3,4	3,3	7,722
8	44	3,8	2,6	3	3,1	7,254
9	47	2,7	3,1	2,7	2,8	6,552
10	19	3,1	3,2	3,3	3,2	7,488